POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dell'Informazione

Corso di Laurea in "Sound Engineering and Design"

CONTRIBUTO DELL'EFFETTO LOMBARD NELL'AUMENTO DEL CONFORT ACUSTICO DI UN AMBIENTE

Polo Regionale di Como

Relatore: Prof. Giuseppe Bertuccio

Tesi di Laurea di:

Marco Lainati, matricola 755048

Anno Accademico 2011 – 2012

Ringraziamenti

Ringrazio Eugenio Fontana e Ares Bolognesi che mi hanno seguito durante tutto il lavoro di tesi, nonché tutti i ragazzi dell'azienda AQUST s.r.l..

Ringrazio Alberto Odetti e lo Chef Luca Madau per avermi permesso di svolgere liberamente nel loro ristorante tutte le rilevazioni necessarie per il mio progetto.

Prefazione

La maggior parte dei ristoranti e dei locali pubblici soffre la mancanza di un adatto comfort acustico, il che porta ad una pessima vivibilità nello stesso, scarsa intelligibilità del parlato e, nel caso ci si trovi in aree abitative, screzi con il vicinato a causa del rumore generato.

Per risolvere tale problema, due sono le possibilità d’intervento: isolare acusticamente il locale oppure cercare di agire alla fonte, riducendo il “rumore” che in esso si genera. Ovviamente ciascun metodo presenta pregi e difetti e, soprattutto, la strategia di intervento deve essere scelta in modo oculato sulla base di un’attenta valutazione delle reali condizioni acustiche dell’ambiente considerato.

Isolamento Acustico		**Fonoassorbimento**	
PRO	CONTRO	PRO	CONTRO
Isola il locale dagli ambienti circostanti, limitando o eliminando ogni fonte di disturbo verso il vicinato	Intervento molto invasivo a causa della necessità di interventi strutturali su muri, pavimenti e soffitti	Miglioramento del comfort acustico attraverso la diminuzione del tempo di riverbero e sfruttando l’effetto Lombard	Occorre assicurarsi che esistano le condizioni per poterlo implementare
	Diminuzione del livello di pressione sonora solo all’esterno del locale	Diminuzione del livello sonoro generale all’interno del locale e, conseguentemente, anche all’esterno	Non è possibile raggiungere “qualsiasi” risultato; il risultato ottenibile è strettamente connesso a dei limiti fisici e comportamentali ben precisi
	Comporta un alto costo causato, tra l’altro, anche dalla necessità di chiusura dell’esercizio per il tempo necessario a realizzare i lavori	Utilizzo di materiali fonoassorbenti che, per la loro semplicità e rapidità d’installazione, necessitano una minima chiusura del locale per lavori	
	Potrebbe snaturare il design interno dell’ambiente	Costi di intervento contenuti	
	Non risolve il problema del “disagio” generato dall’eccessivo rumore	Data la non invasività dell’intervento, non viene snaturato il design interno del locale	

Sicuramente, come brevemente accennato, la peculiarità di un intervento di fonoassorbimento risiede nello sfruttamento di un fenomeno psicoacustico chiamato *”Effetto Lombard”*, secondo il quale una persona tende ad alzare o abbassare il volume della propria voce in relazione al livello di rumore che lo circonda.

Il progetto, sviluppato per conto di AQUST presso il ristorante Barracudino Easy&Chic, sito a Monza, via Cattaneo 7/b, si è posto come obbiettivo quello di migliorare il comfort acustico del locale, diminuendone in questo modo il livello di pressione sonora generato internamente e, conseguentemente, anche all’esterno.

La tesi si sviluppa secondo i seguenti capitoli:

- ***Capitolo 1 – Appunti di Fisica Acustica:*** in questo capitolo si tratterà della natura del suono, gli elementi che lo caratterizzano ed il modo di descriverlo e trattarlo in ambienti chiusi e aperti. Si porrà particolare attenzione al concetto di tempo di riverbero, esaminando i due diversi approcci per descriverlo, e al concetto di Sound Pressure Level(SPL), analizzando il legame che unisce queste due grandezze.

- ***Capitolo 2 – Elementi di Psicoacustica:*** in questo capitolo si esaminerà il concetto di sensazione uditiva, esplorando l’anatomia dell’apparato uditivo, e la relazione che esiste fra suono e sua percezione.

- ***Capitolo 3 – Confort Acustico:*** in questo capitolo verrà introdotto l’effetto Lombard e saranno esaminati gli indici che descrivono il concetto di confort acustico, con riferimento in particolare ai locali di ristorazione.

- ***Capitolo 4 - Misuratori di Livello sonoro:*** partendo dalla descrizione di un generico fonometro, in questo capitolo verrà mostrato in che modo trattare i risultati rilevati a seguito di una misurazione ambientale.

- ***Capitolo 5 – Fonoassorbimento e Fonoisolamento:*** in questo capitolo verranno mostrati i due differenti approcci di trattamento sonoro, con particolare attenzione ai materiali fonoassorbenti. In conclusione si accennerà al concetto di controllo attivo del rumore (ANC).

- ***Capitolo 6 – Rilievi ed Analisi Ambientale:*** in questo capitolo sono raccolti tutti i rilievi e le ipotesi d’intervento presso il ristorante preso in esame, con relativa stima dei risultati da ottenere.

- ***Capitolo 7 – Installazione di Microsorber®:*** in questo capitolo saranno descritte tutte le varie fasi d’installazione della pellicola Microsorber® ed i rilievi eseguiti dopo la posa dello stesso.

- ***Capitolo 8 – Installazione Acustideco®:*** in questo capitolo saranno mostrate le analisi delle prestazioni del materiale, con particolare attenzione alla tela di rivestimento da utilizzare, nonché la modalità d'installazione dello stesso.

- ***Capitolo 9 – Sviluppo Tool di Simulazione in Matlab:*** in questo capitolo verrà descritto il tool creato per l'analisi ambientale del progetto di tesi.

- ***Capitolo 10 - Simulazione dei risultati tramite CARA® :*** in questo capitolo si presenterà un ulteriore tool utilizzato per l'analisi ambientale del progetto di tesi.

- ***Capitolo 11 – Conclusioni e possibili sviluppi futuri:*** in questo capitolo verrà fatto un riassunto generale del lavoro effettuato, verificando le ipotesi iniziali del progetto e i possibili sviluppi di studio futuri.

Indice

Capitolo 1

Appunti di Fisica Acustica

La natura del suono

I movimenti vibratori delle superfici esterne dei corpi immersi nell’aria fanno oscillare, intorno alla posizione di equilibrio, le particelle di gas adiacenti le superfici stesse. In questo modo si generano vere e proprie onde di spostamento caratterizzate da movimenti delle particelle relativamente ridotti in ampiezza e velocità, ma con alta velocità di propagazione.
Gli spostamenti s delle particelle sono legate all’aumento o diminuzione della densità: nel primo caso si assiste ad un aumento di pressione, nel secondo ad una diminuzione; in questo modo vengono generate onde di pressione strettamente legate a quelle di spostamento.

L’orecchio umano è in grado di percepire variazioni di pressione che vanno da 20µPa a 20Pa; variazioni di pressione superiore causano sensazioni di fastidio e danni uditivi immediati se si arriva a 60Pa.

Le onde sonore possono essere descritte da un pistone che si muove di moto continuo e armonico(Figura1.1), producendo onde piane progressive per cui valgono le relazioni

$$f = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$$

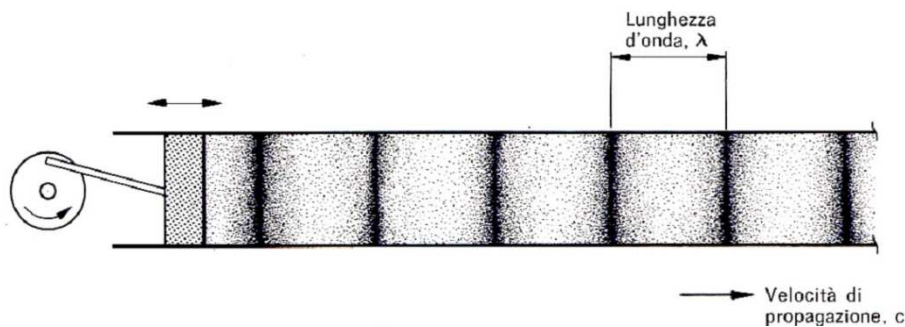



Figura 1.1 Pistone che si muove in moto continuo e armonico

Dove f è la frequenza in Hertz, T è il periodo in secondi, c è la velocità di propagazione del suono (pari a 343 m/s per una temperatura di 20°C), λ è la lunghezza d’onda in metri. I suoni udibili hanno una frequenza compresa fra i 20 e i 20K Hz, per una lunghezza d’onda compresa fra 17m e 17mm.

La funzione spostamento s è definita come:

$$s = s_m \cos(\omega t - kx)$$

Con s_m ampiezza dello spostamento,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

è la pulsazione, coincidente con la velocità angolare,

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{cT} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

è il numero d'onda. In pratica kx rappresenta lo sfasamento,in ritardo, dell'onda progressiva nel punto generico di ascissa x rispetto al punto di ascissa 0 dove è collocata la sorgente.

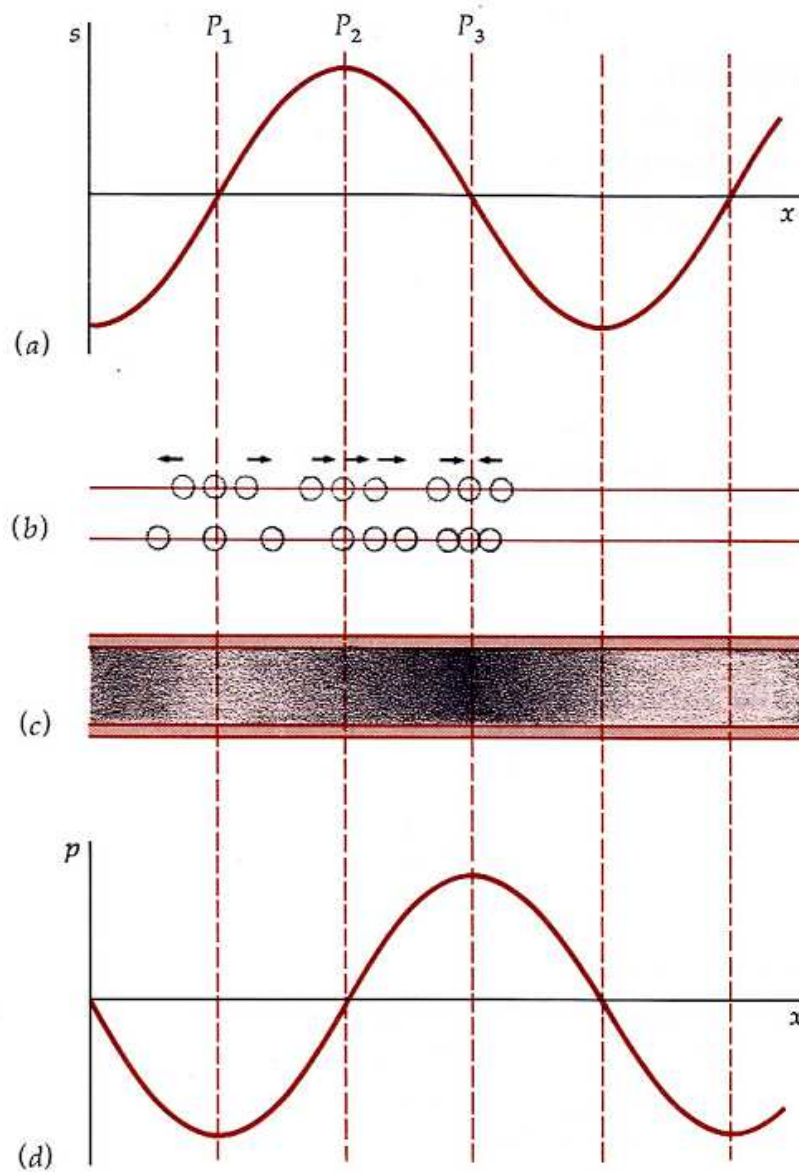



Figura 1.2 Rappresentazione di un'onda sonora

La funzione spostamento ha un andamento del tipo illustrato nella Figura1.2 (a), con spostamento delle particelle rappresentate in Figura1.2 (b): si può notare come in P_1 e P_3 lo spostamento sia nullo, mentre nel punto P_2 è massimo.
Dalla Figura1.2 (c) si può inoltre notare come la densità sia minima in P_1 dove le particelle si allontanano, massima in P_3 dove le particelle si avvicinano, invariata in P_2; pertanto la distribuzione istantanea della variazione di pressione, rappresentata in Figura2 (d), risulta essere:

$$p = p_m \cos[\,(\omega t - kx) + \frac{\pi}{2}\,]$$

Dove p_m è l'ampiezza delle oscillazioni.

Descrizione dei suoni

Una sorgente che si muove di moto armonico genera suoni detti puri; suoni ad una sola frequenza sono però ideali, e non trovano, in pratica, molti riscontri. I suoni emessi dagli strumenti musicali sono invece periodici, ed in un periodo è possibile identificare l’armonica fondamentale (più bassa) e quelle superiori multiple della stessa; un segnale periodico si ripete regolarmente nel tempo ed è caratterizzato da un timbro specifico dipendente dal numero di armoniche presenti e dalla loro intensità.

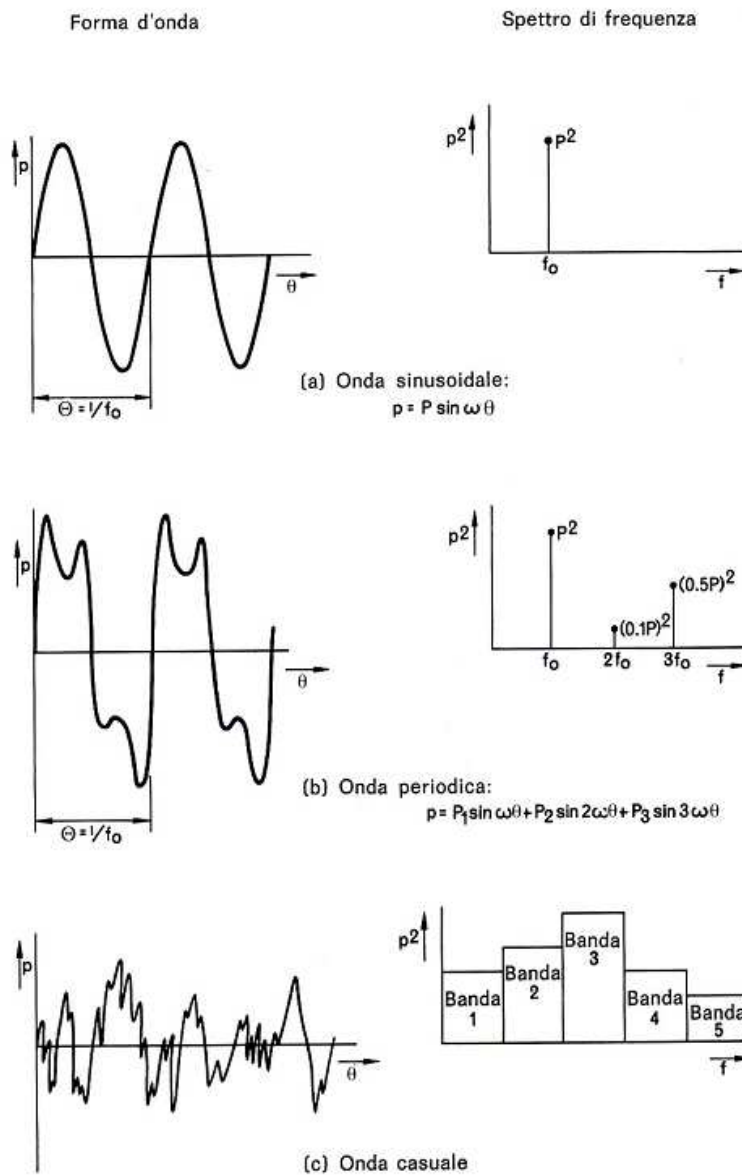



Figura 1.3 Tipologie di onde sonore

In Figura1.3 sono rappresentati le diverse tipologie di suoni: puro (a), periodico (b). Poiché i suoni periodici rappresentano comunque una realtà ristretta, nella maggior parte dei casi si parla di suoni casuali, irregolari nel tempo e con un numero di frequenze variabili; per questa ragione, come evidenziato in Figura1.3 (c), si forniscono solitamente indicazioni sull’importanza statistica complessiva delle frequenze contenute nelle diverse bande.

La Pressione sonora

Si definisce pressione sonora la variazione media di pressione rispetto alla pressione atmosferica, facendo riferimento al suo valore efficace, cioè al valore quadratico medio RMS. Per cui si definisce:

$$p = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt}$$

Dove t_2-t_1 è un intervallo di tempo abbastanza grande rispetto al periodo di oscillazione. Nel caso di suono puro, la formula si semplifica

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T \; {p_m}^2 \, [\sin(\omega t)]^2 \, dt} = \sqrt{\frac{{p_m}^2}{2}} = \frac{p_m}{\sqrt{2}}$$

Con T periodo delle oscillazioni.

Potenza, intensità e densità di energia sonora

Qualunque sia la sorgente che genera l’onda, tutta l’energia sonora emessa deve essere ritrovata all’interno del sistema acustico, al netto di eventuali assorbimenti da parte delle superfici.

Sul piano energetico, i suoni sono caratterizzati, prima di tutto, dall’intensità sonora I definita come potenza sonora W trasmessa attraverso l’unità di superficie A perpendicolare alla direzione di propagazione dell’onda longitudinale considerata

$$I = \frac{dW}{dA}$$

Espressa in watt per metro quadro(W/m^2). L’intensità qui definita è riferita ad una singola onda.

Nel caso di onde sferiche emesse da sorgenti ipotizzate puntiformi (Figura1.4), la superficie A sia una sfera

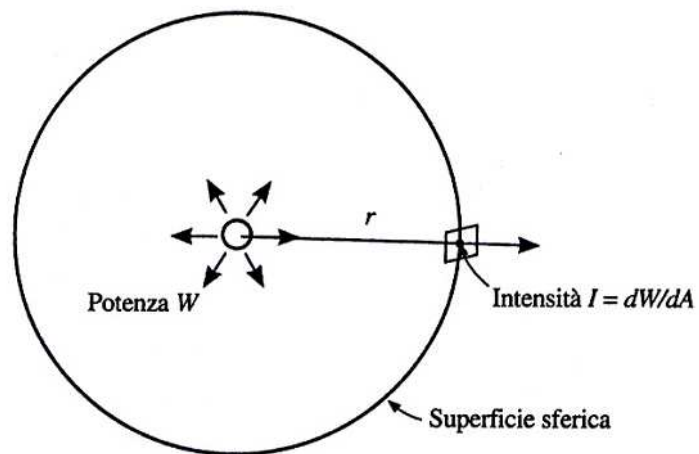



Figura 1.4 Rappresentazione di una sorgente puntiforme

È possibile definire la potenza sonora come

$$W = 4\pi r^2 I$$

Scala dei Decibel e Livelli Sonori

Dal momento che una scala lineare per la misura delle pressioni sonore fornirebbe numeri compresi in un intervallo di ben sei ordini di grandezza, e poiché l'udito risponde alla variazione di pressione in maniera logaritmica, si è deciso fin da principio di utilizzare scale logaritmica.

Dal momento che l'argomento del logaritmo deve essere un numero adimensionale, l'uso di tali scale non è associato alla valutazione diretta di una grandezza, ma alla valutazione dei rapporti tra i valori della grandezza in esame ed un valore convenzionale preso come riferimento.

Le misure di livello vengono espresse in decibel (dB).

Livello di Pressione Sonora(SPL)

Nel caso della pressione sonora si preferisce, per motivi d'interesse pratico, fare riferimento al quadrato della pressione stessa. Ciò premesso, il livello di pressione sonora (SPL), misurato in decibel, è definito come:

$$L_p = 10Log\frac{p^2}{{p_0}^2} = 20Log\frac{p}{p_0}$$

Dove p_0 è la pressione di riferimento pari a 20µPa, cioè il valore medio di soglia uditiva per ascolto in cuffia di un tono puro alla frequenza 1k Hz.

Se, ad esempio, viene rilevato una pressione sonora di 2 Pa, SPL calcolato è:

$$L_p = 20Log\frac{2}{20\ 10^{-6}} = 20Log10^5 = 20\ 5 = 100\ dB$$

Nella tabella seguente (Tabella1.1) sono riportati i valori medi di pressione sonora in alcuni ambienti e condizioni

Pressione sonora Pa	*Livello di pressione sonora dB*	*Ambiente o condizione*	*Valutazione soggettiva media*
200	140	Aereo militare in decollo, a 30 m	Intollerabile
63	130	Rivettatura pneumatica (posto di lavoro dell'operatore)	
20	120	Sala caldaie (livello massimo) Sala macchine di una nave (a piena velocità)	
6,3	110	Pressa automatica (posizione dell'operatore) Laminatoio - rettifica a mano Tessitura	Molto rumoroso
2	100	Tornitura automatica Pensilina di metropolitana (livello massimo) Sala stampa	
$6{,}3 \times 10^{-1}$	90	Autocarri pesanti, a 6 m Cantiere: perforatrice pneumatica	
2×10^{-1}	80	Marciapiede di strada con traffico intenso Ufficio con macchine tabulatrici	Rumoroso
$6{,}3 \times 10^{-2}$	70	Apparecchio radio a volume alto (in locali d'abitazione)	
2×10^{-2}	60	Ristorante Grande magazzino	
$6{,}3 \times 10^{-3}$	50	Conversazione, a 1 m Ufficio pubblico	Tranquillo
2×10^{-3}	40	Zona urbana periferica Conversazione bisbigliata, a 2 m Zona residenziale di notte	
$6{,}3 \times 10^{-4}$	30		Molto tranquillo
2×10^{-4}	20	Rumore di fondo in studi televisivi e di registrazione	
$6{,}3 \times 10^{-5}$	10		
2×10^{-5}	0	Soglia di udibilità di un suono puro a 1000 Hz	

Tabella 1.1 Liveli medi di pressione sonora nei diversi ambienti

Livello di Potenza Sonora

Analogamente, il livello di potenza sonora, misurato in decibel, è definito come:

$$L_w = 10Log\frac{W}{W_0}$$

Con W_0 potenza sonora di riferimento pari a 10^{-12} W.

È utile osservare che le potenze sonore sono di solito molto inferiori alle potenze meccaniche od elettriche utilizzate dalle sorgenti sonore. Ad esempio, un amplificatore da 100W produrrà una potenza sonora di al massimo 2 W, pari al prodotto fra la potenza elettrica per alimentare gli altoparlanti ed il rendimento acustico degli altoparlanti stessi.

Di seguito è mostrata una tabella (Tabella 1.2) con descritte le potenze sonore per tipologia di sorgente.

Potenza sonora *W*	*Livello di potenza sonora* *dB*	*Tipo di sorgente*
$25 \div 40 \times 10^6$	195	Missile Saturno
10^5	170	Statoreattore Turboreattore con postcombustore
10^4	160	Turboreattore con spinta di 3200 kg
10^3 10^2	150 140	Aereo di linea a 4 propulsori
10	130	Orchestra con 75 componenti } valore efficace Organo a canne } massimo su 1/8 s Motore di un piccolo aereo
1	120	Martello perforatore Pianoforte } valore efficace Tuba in si bemolle } massimo su 4 s
10^{-1}	110	Apparecchio radio al massimo volume Ventilatore centrifugo (22.000 m³/h)
10^{-2}	100	Telaio da 1 m Autoveicolo in marcia su autostrada
10^{-3}	90	Ventilatore assiale (2.500 m³/h) Voce gridata (valore efficace su lungo periodo di tempo)
10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8}	80 70 60 50 40	Conversazione (valore efficace su lungo periodo di tempo)
10^{-9}	30	Bisbiglio

Tabella 1.2 Potenza sonora per tipologia di sorgente

Livello di Intensità sonora

Come nei casi precedenti, il ragionamento è analogo anche nel caso del calcolo del livello di intensità sonora:

$$L_I = 10Log\frac{I}{I_0}$$

Dove I_0 è il livello di intensità sonora di riferimento assunto pari a 10^{-12}W/m^2.

Per temperature intorno ai 20°C, $I = \frac{p^2}{\rho_0 c}$, dove ρ_0c rappresenta l'impedenza acustica del mezzo, si può notare come

$$\frac{I}{I_0} = \frac{p^2}{\rho_0 c}\frac{\rho_0 c}{{p_0}^2} = \frac{p^2}{{p_0}^2} \Rightarrow L_i = L_p$$

Pertanto si può concludere che i livelli d'intensità e pressione sonora in aria sono uguali nell'intorno della temperatura ambiente.

Composizione di Livelli

Molto spesso nella pratica si deve valutare l'effetto combinato di più sorgenti che agiscono contemporaneamente. Ovviamente non si potranno sommare tra loro i vari livelli, ma si sommeranno gli argomenti dei logaritmi:

$$L_{pToT} = 10Log\left(\frac{{p_1}^2}{{p_0}^2} + \frac{{p_2}^2}{{p_0}^2} + \frac{{p_3}^2}{{p_0}^2} + \cdots + \frac{{p_n}^2}{{p_0}^2}\right) = 10Log\left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \cdots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}}\right)$$

Se, per esempio, si devono sommare due livelli L_1=90dB e L_2=85dB, si ottiene:

$$L_{pToT} = 10Log\left(10^{\frac{90}{10}} + 10^{\frac{85}{10}}\right) = 10Log(1.316\ 10^9) = 91.2\ dB$$

Se, viceversa, si ha un livello complessivo L_{pToT}=91.2 dB ed un rumore di fondo pari a L_f=85 dB, è possibile ricavare il livello di pressione sonora efficace L_{ps} come:

$$L_{ps} = 10Log\left(10^{\frac{91.2}{10}} - 10^{\frac{85}{10}}\right) = 10Log(10^9) = 90\ dB$$

Campo Libero

Si definisce campo libero un campo sonoro generato in un mezzo omogeneo ed isotropo, nel quale le onde generate saranno progressive e con pressione e velocità di vibrazione in fase. E’ ovviamente un concetto ideale, che permette però di giungere a risultati accettabili

Supponiamo di avere una sorgente puntiforme: l’onda generata sarà sferica se la sorgente è sospesa nello spazio, emisferica se posata su di una superficie piana perfettamente riflettente. Sotto queste ipotesi, il modulo dell’intensità sonora sarà:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2}$$

Dove r è la distanza dalla sorgente e W la potenza acustica della stessa. Passando ai decibel otteniamo:

$$L_I = L_w - 20Logr - 10Log4\pi = L_w - 20Logr - 11$$

Nel caso di distribuzione emisferica avremo invece:

$$I = \frac{W}{2\pi r^2}$$

$$L_I = L_w - 20Logr - 10Log2\pi = L_w - 20Logr - 8$$

Sapendo inoltre che per un treno d’onde progressivo vale sempre la relazione:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

Sostituendo nell’equazione precedente, ottengo il livello di pressione acustica:

$$L_p = L_w - 20Logr - 11$$

Queste formule sono valide in casi puramente teorici. Nella realtà diversi fattori ci allontanano dal campo libero:

- Direttività della sorgente
- Attenuazione dovuta all’assorbimento del mezzo
- Effetto del vento e dei gradienti di temperatura
- Attenuazione dovuta a precipitazioni atmosferiche
- Attenuazione dovuta al suolo
- Attenuazione dovuta a barriere artificiali

Per tener conto di tutto ciò, vengono introdotti due indici: uno relativo alla direttività della sorgente, uno dovuto alla somma di tutti gli effetti meteorologici od ambientali.

$$L_{I\theta} = L_w - 20Logr - 11 + DI_\theta + \sum A_{amb}$$

Dove θ indica che valutiamo la direttività lungo una certa direzione. I valori di A_{amb} si trovano in letteratura e rappresenta tutte quelle attenuazioni che intervengono in un ambiente esterno, dovute ad esempio da agenti atmosferici, dal suolo, dalla temperatura.
DI_θ rappresenta l’indice di direttività definito come:

$$DI_\theta = 10LogQ_\theta$$

Con Q_θ fattore di direttività (figura 1.5) definito come rapporto tra il modulo dell’intensità acustica valutato lungo la direzione θ, ed il modulo dell’intensità acustica che produrrebbe una sorgente omnidirezionale di uguale potenza di quella reale, alla stessa distanza.

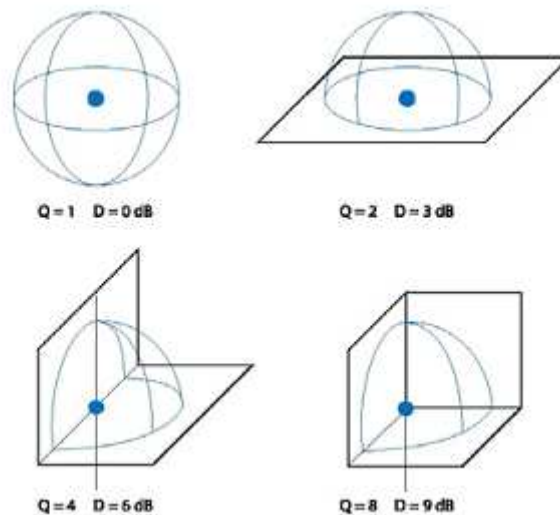



Figura 1.5 Indice di direttivita' Q

Tipo di emissione	*Q*	*Indice di direttività*
Sferica	1	0 dB
Emisferica	2	3 dB
Tra due superfici ortogonali	4	6 dB
Tra tre superfici ortogonali	8	9 dB

Tabella 1.3. Indice di direttività Q

Propagazione in ambienti chiusi

Sempre più spesso i canoni di vita ci portano a trascorrere gran parte della nostra vita in ambienti chiusi; contemporaneamente è nata l'esigenza di progettare ambienti acusticamente adeguati alla loro destinazione d'uso.

Per questo motivo è necessario conoscere i meccanismi di propagazione del suono negli spazi confinati, nei quali una sorgente sonora determina due campi sovrapposti:

- *Campo Sonoro Diretto:* prodotto dal suono che si trasmette direttamente dalla sorgente al ricettore; dipende principalmente dalla distanza fra questi due e il decadimento sonoro è eguagliabile a quello del suono in un campo libero.
- *Campo Sonoro Riverberante:* prodotto dalle riflessioni delle onde sonore sulle pareti che delimitano l'ambiente; dipende dalla geometria di quest'ultimo e dalle caratteristiche di assorbimento del rumore

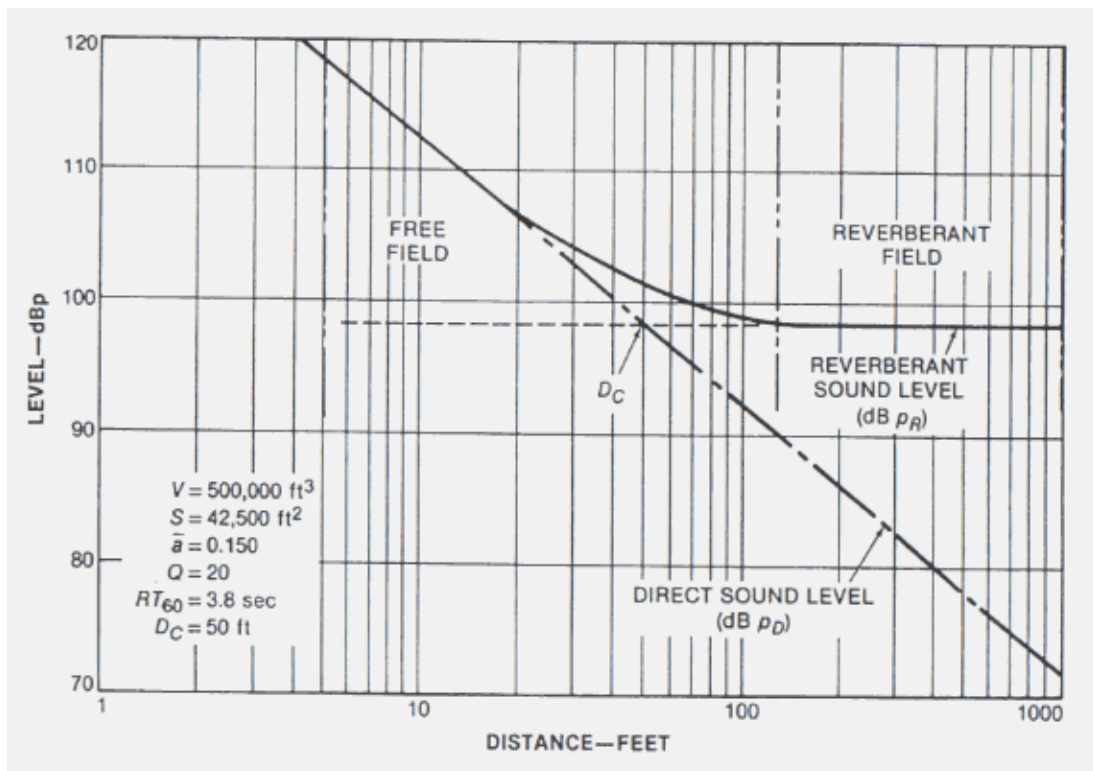



Figura 1.6. Esempio di riduzione del livello di presione sonora in base alla tipologia di campo e alla distanza

Come mostrato in Figura1.6, il decadimento sonoro in prossimità della sorgente è controllato esclusivamente dal suono diretto, mentre a distanze superiori prevale il suono riflesso.

Assorbimento Acustico

L'energia acustica incidente una parete in un ambiente chiuso verrà in parte rimandata nella stanza, in parte assorbita ed in parte trasmessa all'esterno. L'energia rimandata è composta dalla parte riflessa specularmente, da quella eventualmente diffusa e da quella che, dopo essere stata assorbita dalla parete, ritorna nella stanza in virtù delle proprietà elastiche della parete che viene messa in vibrazione dal suono incidente.

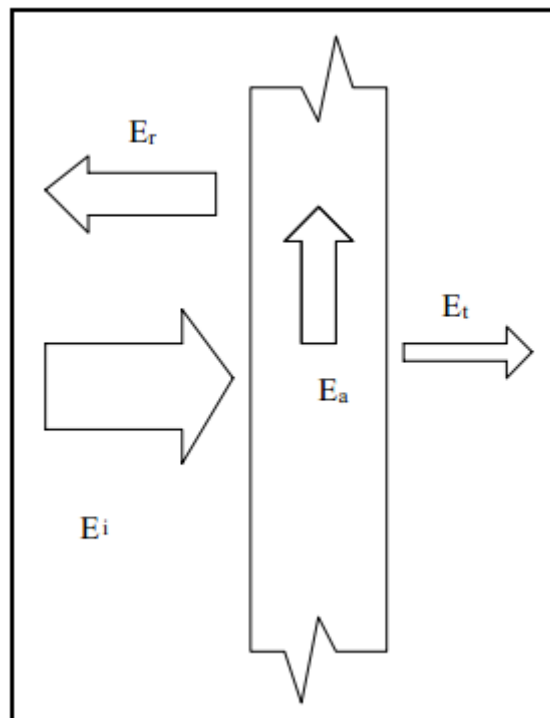



Figura 1.7. Assorbimento acustico lungo una parete

Detta:

E_i l'energia incidente
E_r l'energia riflessa
E_a l'energia assorbita
E_t l'energia trasmessa

E' possibile definire:

$$E_i = E_r + E_a + E_t$$

Dividendo per E_i, si ottiene:

$$r + a + t = 1$$

Con:

$r = \frac{E_r}{E_i}$ coefficiente di riflessione, $a = \frac{E_a}{E_i}$ coefficiente di assorbimento e $t = \frac{E_t}{E_i}$ coefficiente di trasmissione.

Quando si lavora in ambienti confinati, si suole considerare il coefficiente di assorbimento apparente α, definito come:

$$\alpha = a + t$$

Dato che normalmente in una sala i coefficienti di assorbimento apparenti non sono uguali fra loro, si definisce un coefficiente medio tramite la relazione:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_i S_i}{S}$$

Dove α_i sono i coefficienti di assorbimento delle singole superfici S_i, e S è la superficie totale della stanza.
Infine va osservato che il valore dei coefficienti di assorbimento non varia ad alte frequenze, qualunque sia l'angolo d'incidenza, mentre a basse frequenze è maggiore rispetto a quelli per incidenza normale la superficie (Tabella 1.4).

Assorbimento [Hz]	**125**	**250**	**500**	**1000**	**2000**	**4000**
Materiali a parete e/o soffitto						
Controsoffitto in fibra minerale (25 mm su plenum 300 mm)	0,25	0,8	0,8	0,9	0,9	0,99
Melammina espansa (50 mm)	0,23	0,19	0,49	0,83	0,97	0,92
Cartongesso	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Fibra di legno mineralizzata (50 mm) in aderenza	0,17	0,22	0,42	0,78	0,65	0,95
Fibra di poliestere (50 mm)	0,27	0,49	0,70	0,80	0,83	0,81
Intonaco liscio	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Intonaco grezzo	0,02	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03
Lana di vetro 50 Kg/m3 50 mm	0,17	0,86	1,00	1,00	1,00	0,98
Lana di vetro 50 Kg/m3 100 mm	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97
Lana di vetro 100 Kg/m3 50 mm	0,16	0,71	1,00	1,00	0,99	0,99
Poliuretano espanso (piramide 50 mm)	0,10	0,24	0,37	0,72	0,66	0,64
Pannellatura in legno	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Perline	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Portauova dritti sul muro	0,01	0,07	0,43	0,62	0,51	0,70
Sughero biondo (40 mm)	0,22	0,38	0,50	0,45	0,53	0,68
Tenda velluto 0,47 Kg/mq 1/2 area	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Vetro	0,18	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02
Materiali a pavimento						
Linoleum a pavimento	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Cemento a pavimento	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Moquette leggera (pelo 3mm)	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
Moquette media (pelo 6 mm)	0,05	0,10	0,15	0,30	0,50	0,55
Materiali vari						
Persona (valore di A ciascuna in m2)	0,40	0,75	1,10	1,30	1,40	1,10
Sedie e scrivanie (A x ciascuna persona inm2)	0,03	0,05	0,05	0,10	0,15	0,10

Tabella 1.4. Coefficienti di assorbimento per tipologia di materiale e per frequenza

Cammino libero medio

Le variazioni di densità di energia avvengono in modo discontinuo. Per quantificare il problema bisognerebbe conoscere i tempi di ritorno delle riflessioni; per fare ciò, un utile aiuto può venire dal calcolo del cammino libero medio di un’onda, che vale:

$$d = \frac{4V}{S}$$

Dove V è il volume della stanza e S l’area totale della stessa. E’ stato dimostrato che, per stanze dove non vi siano forti disuniformità di energia acustica, il valore di cammino medio di un’onda è di poco inferiore rispetto a quello calcolato.

Densità di energia all’interno di una sala

All’interno di una sala si deve tener conto sia del suono diretto, che di quello riflesso. Supponiamo che una sorgente sonora emetta una potenza W, è corretto ritenere che a regime tutta la potenza colpisco l’ascoltatore direttamente, mentre la parte riflessa, pari a W(1-$\bar{\alpha}$), contribuisca al campo riverberante. In questo caso si può scriver che la densità totale D di energia acustica, in condizione di regime, sia:

$$D(r) = D_d(r) + D_r$$

Dove $D_d(r)$ è la densità di energia in un certo punto distante r dovuta al campo diretto, mentre D_r è la densità del campo riverberante.

Per quel che riguarda il campo diretto, vale l’equazione:

$$D_d(r) = \frac{W}{4c\pi r^2} Q_\theta$$

Con Q_Θ fattore di direttività definito come rapporto tra il modulo dell’intensità acustica valutato lungo la direzione θ, ed il modulo dell’intensità acustica che produrrebbe una sorgente omnidirezionale di uguale potenza di quella reale, alla stessa distanza, c è la velocità del suono (343 m/s circa).

Per il campo riverberante bisogna ricordare che, a regime, l’energia assorbita eguaglierà quella prodotta dalla sorgente che partecipa alla formazione del campo riverberato. Per cui vale l’equazione:

$$D_r V \bar{\alpha} = W(1 - \bar{\alpha}) t_m$$

Dove V è il volume della stanza, t_m è il tempo medio fra due riflessioni e $\bar{\alpha}$ è il coefficiente medio di assorbimento.

Sapendo che:

$$t_m = \frac{d}{c} = \frac{4V}{Sc}$$

Otteniamo:

$$D_r = \frac{4W}{Sc}\frac{1-\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} = \frac{4W}{cR}$$

Dove R, definita come costante della sala, vale:

$$R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$$

e rappresenta le caratteristiche di assorbimento del locale: più è alta, maggiore è la capacità di assorbimento acustico delle superfici della sala.

Sostituendo il tutto nell’equazione di partenza, si ottiene:

$$D(r) = \frac{W}{c}\left(\frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

Che, trasformato in logaritmo diventa:

$$L_p = L_w + 10Log\left(\frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

Svolgendo il logaritmo, si ottiene la famosa formula sul livello di pressione sonora:

$$L_p = L_W - 20Logr - 11 + DI_{Q_\theta} + X_{stanza}$$

Dove X_{stanza} rappresenta l’insieme dei fattori caratteristici della stanza:

$$X_{stanza} = 10Log\left(R + \frac{16\pi r^2}{Q_\theta}\right) - 10LogR$$

Analizzando l'equazione del livello della pressione sonora, è possibile determinare l'andamento della stessa in funzione della distanza dalla sorgente e della costante d'ambiente (Figura1.8):

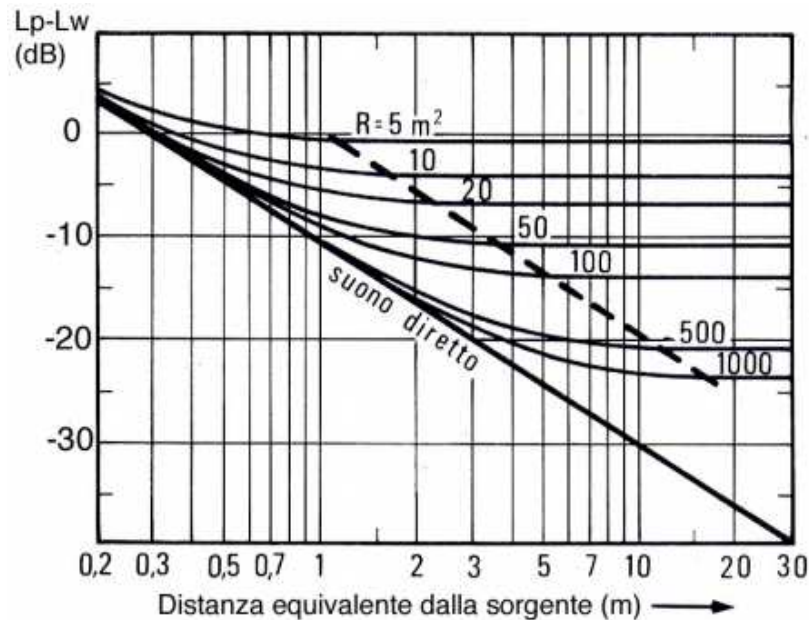



Figura 1.8. Andamento intensità sonora in relazione alla costante d'ambiente R e la distanza dalla sorgente

L'andamento in prossimità della sorgente è quella del campo libero, con una riduzione dell'intensità sonora proporzionale al reciproco del quadrato della distanza; più lontano si arriva ad un valore asintotico tanto più basso quanto più alta è la costante d'ambiente, cioè quanto maggiore è il potere di assorbimento acustico delle pareti della stanza.

Infine, se si eguagliano i termini argomento del logaritmo, si ottiene la definizione della distanza critica dalla sorgente:

$$r_c = \sqrt{\frac{RQ}{16\pi}}$$

Tale equazione esprime la distanza in corrispondenza della quale la densità di energia del campo diretto è uguale alla densità di energia del campo riverberato. La distanza critica è utile per verificare se, in un determinato punto dello spazio, domina il contributo del campo diretto o riverberante.

Per esempio, per ridurre il livello sonoro, poco giova aumentare il fono assorbimento del locale se ci si trova in un punto ad una distanza minore della distanza critica; viceversa, se ci si trova in un punto ad una distanza maggiore della distanza critica, il livello di pressione sonora può essere ridoto tramite fonoassorbimento, ed è inoltre possibile verificare la riduzione dello stesso tramite l'equazione:

$$\Delta L_p = 10Log(\frac{R_{dopo}}{R_{prima}})$$

Tempo di riverberazione

Dato un campo diffuso, accesa la sorgente sonora, dopo un certo periodo di tempo si giunge alla condizione di regime per cui la densità di energia all'interno della stanza è D_r; essendo il caso diffuso, D_r non è funzione della sorgente.

Una volta spenta la sorgente, D_r rimarrà costante per un certo periodo t_m=d/c, dove d è il cammino libero medio e c la velocità del suono. Al tempo t_m avverrà la prima riflessione, per la quale una parte di energia pari a $D_r\bar{\alpha}$ viene assorbita,mentre la parte $(1-\bar{\alpha})D_r$ è rinviata nella stanza. Dopo n riflessioni, in un intervallo di tempo che varia fra $t_n=nt_m$ e $t_{(n+1)}=(n+1)t_m$, la densità di energia acustica presente nella sala sarà pari a:

$$D = (1-\bar{\alpha})^n D_r$$

A questo punto due sono le ipotesi elaborate relative al decadimento del suono:

- **Ipotesi di Eyring:** il decadimento avviene per quantità discrete di densità di energia acustica. Nel caso il tempo trascorso sia grande rispetto al tempo medio fra due riflessioni, la curva di decadimento può essere approssimata a

$$D = (1-\bar{\alpha})^{\frac{t}{t_m}} D_r$$

e, per la definizione di tempo di riverberazione, è possibile scrivere:

$$\frac{D}{D_r} = 10^{-6} = (1-\bar{\alpha})^{\frac{T_{60}}{t_m}} \xrightarrow[\substack{passando\\ all'esponenziale}]{} 10^{-6} = \left[e^{\ln(1-\bar{\alpha})}\right]^{\frac{T_{60}}{t_m}}$$

dove T_{60} è il tempo di riverbero, nel quale il segnale, una volta spenta la sorgente sonora, diminuisce di 60dB.
Facendo il logaritmo in base 10 e sostituendo t_m=d/c=4V/Sc, otteniamo:

$$T_{60} = -\frac{55.3}{c}\frac{V}{S ln(1-\bar{\alpha})}$$

Considerando che il logaritmo è negativo, ed ipotizzando che ci troviamo in condizioni atmosferiche normali, otteniamo la *Formula di Eyring*:

$$T_{60} = 0.161\frac{V}{S|\ln(1-\bar{\alpha})|}$$

- **Ipotesi di Sabine:** si suppone che l'assorbimento di energia acustica avvenga in modo continuo (approssimazione tanto vera quanto è più compatta la stanza). Possiamo scrivere l'equazione dell'energia in termini infinitesimi:

$$Wdt = \bar{\alpha}DV\frac{dt}{t_m} + V\frac{dD}{dt}dt \xrightarrow[\substack{sostituendo \\ t_m}]{} Wdt = \frac{\bar{\alpha}Sc}{4}Ddt + V\frac{dD}{dt}dt$$

Al momento dello spegnimento della sorgente la potenza acustica si annulla,per tanto si ottiene

$$\frac{\bar{\alpha}Sc}{4}D = -V\frac{dD}{dt}$$

risolvendo l'equazione differenziale tenendo conto delle condizioni al contorno ($D=D_r$ per t=0):

$$ln\frac{D}{D_r} = -\frac{cS\bar{\alpha}}{4V}t \xrightarrow[\substack{svolgendo\ il \\ logaritmo\ naturale}]{} \frac{D}{D_r} = e^{-\frac{cS\bar{\alpha}}{4V}t}$$

Dalla definizione di tempo di riverbero otteniamo

$$ln10^{-6} = -\frac{cS\bar{\alpha}}{4V}T_{60}$$

Considerando che ci troviamo in condizioni atmosferiche normali, ricaviamo la famosa *Formula di Sabine,*il quale la ricavò per via sperimentale:

$$T_{60} = 0.161\frac{V}{S\bar{\alpha}}$$

Nonostante le sue limitazioni, la formula di Sabine è la più usata in campo tecnico per via della sua semplicità. Bisogna ricordare comunque che, a causa della dipendenza di $\bar{\alpha}$ dalla frequenza, è necessario calcolare il T_{60} per ciascuna di esse.

Va inoltre ricordato che, sia nell'ipotesi di Eyring che in quella di Sabine, la densità di energia a regime per il campo diffuso è pari a:

$$D_r = \frac{4W}{cS\bar{\alpha}}$$

Tempo di riverberazione ottimale

La conoscenza del tempo di riverberazione di una sala è fondamentale per la sua progettazione o correzione acustica. La presenza di fenomeni di riverberazione è importante per un buon ascolto, poiché rende il suono più intellegibile ed aumenta la densità di energia nell'ambiente.

Esistono comunque dei tempi di riverbero da rispettare in funzione dell'utilizzo che si vuole fare della sala (Figura1.8). Sono valutazioni soggettive ricavate da esperimenti empirici e legano tempi di riverbero a tipologia di sala.

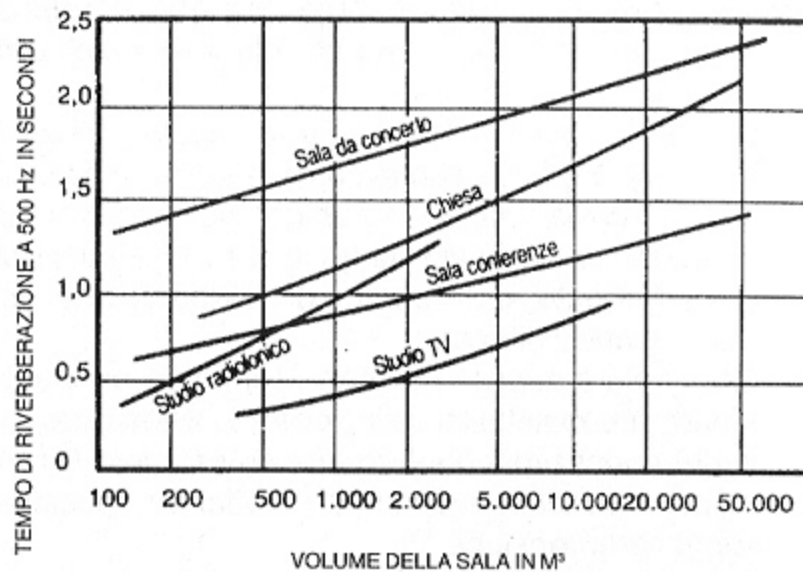



Figura 1.8. Tempi i riverbero in funzione alla tipologia di ambiente

Il tempo di riverbero non è l'unico fattore che interviene nella buona progettazione acustica di una stanza. In generale, i criteri da rispettare sono:

- Tempo di Riverbero Ottimale
- Ritardo delle prime riflessioni ottimali
- Geometria e dimensioni della sala opportune
- Distribuzione omogenea della densità di energia acustica
- Livello sonoro sufficiente
- Rumore di fondo Basso

Attenuazione sonora dovuta all’umidità dell’aria

Il volume d’aria contenuto in auditorium molto grandi o in luoghi di culto imponenti, può assorbire una quantità di energia acustica che non può essere tralasciata; di conseguenza anche il fenomeno del riverbero ne viene condizionato.

Detto questo, il tempo di riverbero diventa:

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{S + 4mV}$$

Dove V è il volume della stanza, S la sua superficie e m rappresenta il coefficiente di attenuazione medio dell’aria, che dipende dall’umidità della stessa e dalla frequenza del segnale che la attraversa (Figura1.9).

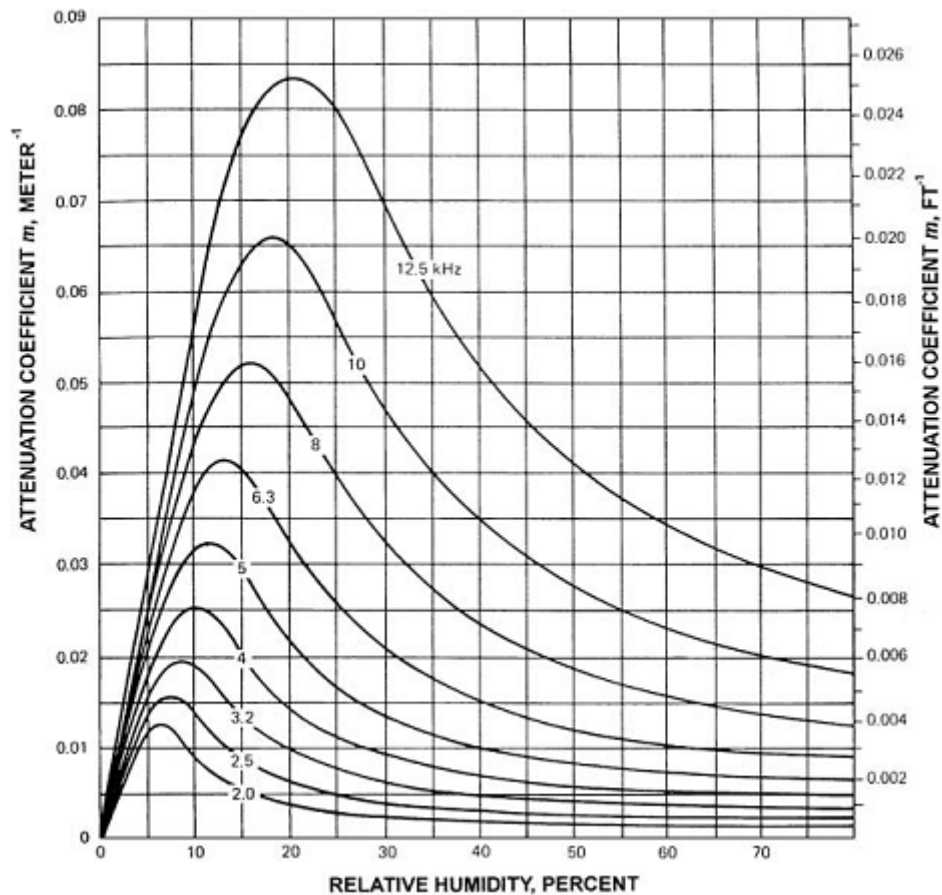



Figura 1.9. Grafico relativo all'attenuazione del suono in relazione all'umidità dell'aria

Nel grafico sono segnati i valori di m in relazione alla frequenza ed alla umidità dell’aria, per una stanza ad una temperatura di 20°C.

La nuova espressione del tempo di riverbero evidenzia come più la stanza è grande, più significante sarà l’assorbimento dovuto all’umidità dell’aria, poiché più lungo sarà il cammino che il suono dovrà fare tra una parete e l’altra.
Inoltre, dal momento che m cresce al crescere della frequenza, è possibile affermare che questa espressione del T_{60} è valida, oltre che per ambienti molto grandi, per frequenze sopra 1kHz.

Relazione fra SPL e Tempo di Riverbero

Giunti a questo punto, è possibile delineare una relazione fra Sound Pressure Level e tempo di riverbero, partendo dall'equazioni calcolate in precedenza:

$$L_p = L_w + 10Log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{R}\right)$$

$$R = \frac{\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}S$$

$$\bar{\alpha} = 0.161\frac{V}{ST_{60}}$$

1. *Analisi Relazione fra $\bar{\alpha}$ e T_{60}*
   Analiticamente parlando, per T_{60} ->+∞, si ottiene $\bar{\alpha}$->0. Fisicamente corrisponde ad avere delle pareti perfettamente riflettenti che non assorbono energia acustica.
   Per T_{60} ->0, si ottiene $\bar{\alpha}$->1, cioè il suo valore limite. In questo caso le pareti assorbono tutta l'energia acustica che le colpisce.

2. *Analisi fra R e T_{60}*
   Per quanto detto prima, quando T_{60}->+∞, R=0, esprimendo il fatto che la stanza non ha alcuna capacità di assorbire l'energia acustica.
   Per T_{60} ->0, R->∞, cioè le pareti sono dei perfetti assorbitori.

3. *Analisi fra SPL e T_{60}*
   L'ultimo punto di analisi è quello più significativo. Se T_{60}->+∞, calcolando il limite si ottiene:
   $$L_p = L_w + 10Log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{0}\right) \sim L_w + 10Log(+\infty) \sim +\infty$$
   Nel caso di pareti perfettamente riflettenti il livello di pressione sonora cresce in maniera logaritmica.
   Se T_{60}->0, si ottiene:
   $$L_p = L_w + 10Log\left(\frac{Q}{4\pi r^2} + \frac{4}{\infty}\right) \sim Lw + 10Log\left(\frac{Q}{4\pi r^2}\right) \sim L_w - 20Logr + DI - 11$$
   Questo è il caso di una camera perfettamente anecoica in cui non vi sono riflessioni ed il suono viene perfettamente assorbito dalle pareti.

E' possibile dire che, per tempi di riverbero molto alti, la pressione sonora subirà un incremento nel suo valore che, a seconda dell'utilizzo della stanza, porterà ad effettuare un intervento di fono assorbimento più o meno importante; viceversa, nel caso di tempi di riverbero molto piccoli, in linea di massima non sarà necessario effettuare alcun tipo di lavoro.

Capitolo 2

Elementi di Psicoacustica

Molti campi della tecnica, tra cui l'acustica, assumono una notevole importanza pratica nel momento in cui si cerca di valutare l'impatto che certi fenomeni fisici hanno sull'uomo. È infatti possibile misurare in modo oggettivo una temperatura, una pressione, una massa, ma ben più arduo è valutare la percezione che porta a definire concetti di più caldo, più rumoroso o più pesante.

La psicoacustica studia le relazioni che legano una grandezza oggettiva come la pressione acustica o la potenza sonora ad una grandezza soggettiva che esprima la sensazione che un individuo prova.

Orecchio Umano

È suddiviso in tre sezioni: orecchio esterno, medio ed interno. La sua forma modifica il segnale acustico in ingresso, influenzando così la sensazione sonora.

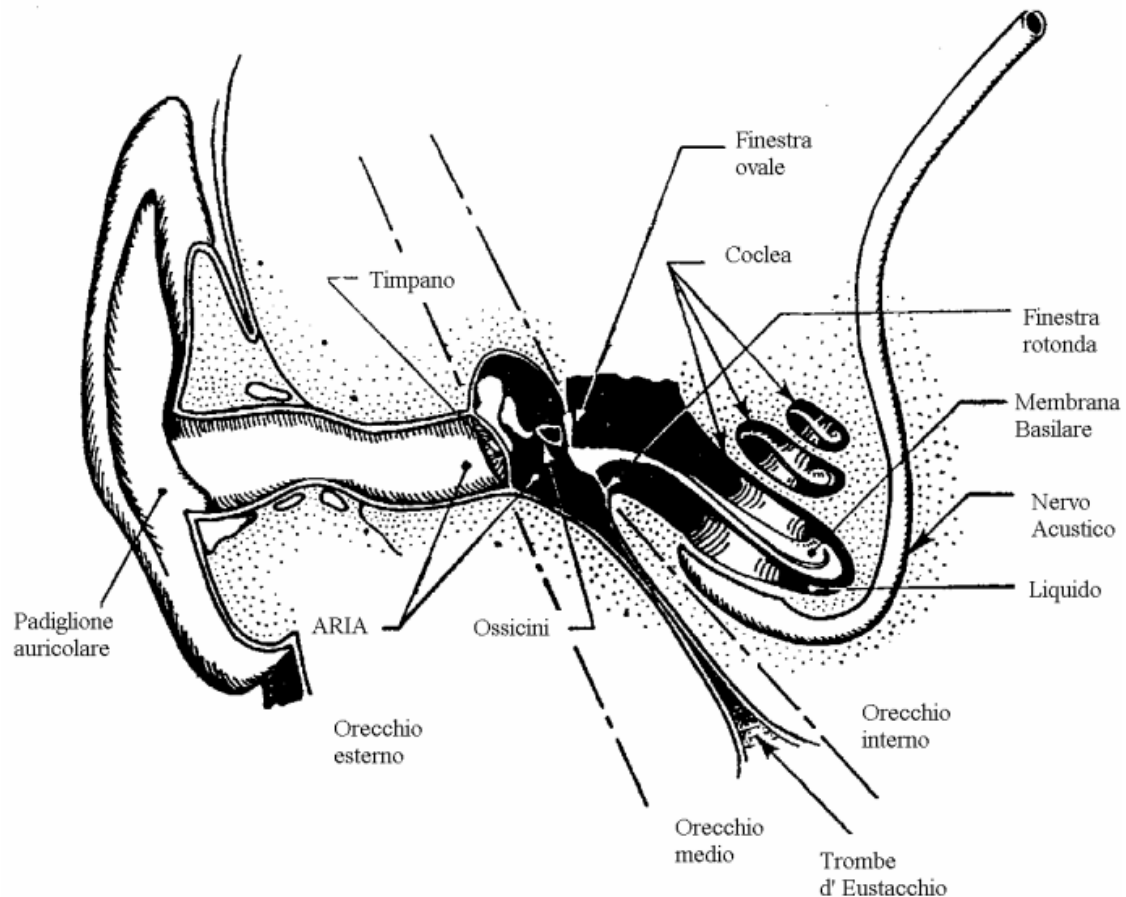



Figura 2.10. L'orecchio umano

Orecchio esterno

È composto essenzialmente dal *padiglione auricolare* (o pinna) e dal *canale uditivo*, chiuso nella parte interna dalla membrana del *timpano*, che lo separa dall’orecchio medio.
La forma del padiglione, diversa per ciascun individuo, influenza il segnale in ingresso amplificando od attenuando certe frequenze; ciò spiega perché la sensazione uditiva cambia a seconda della persona.
La forma e la lunghezza del condotto portano, invece, ad un’amplificazione delle frequenza centrate attorno ai 3k Hz.
L’effetto combinato delle due orecchie e della posizione del capo determina l’amplificazione del segnale di circa 10-15 dB nella banda di frequenze comprese fra i 2k Hz e i 4k Hz; questo fenomeno spiegherebbe perché i primi sintomi dell’ipoacusia (innalzamento della soglia uditiva) avvengano nella banda di terzi d’ottava centrata sui 3k Hz.

Orecchio Medio

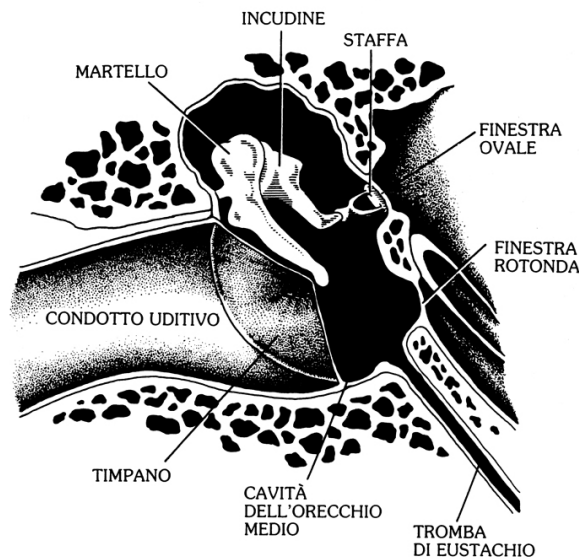



Figura 2.11. Orecchio Medio

L’orecchio medio (Figura 2.2) è una cavità in comunicazione con l’esterno tramite un canale, detto *tuba di Eustacchio*, che lo collega alla faringe; tramite la deglutizione o lo sbadiglio si apre una valvola che permette di riequilibrare la pressione all’interno della cavità.

Il funzionamento di questa sezione è semplice: le onde sonore percepite mettono in vibrazione il timpano; tale vibrazione viene trasmessa, tramite tre ossicini chiamati *martello, incudine e staffa*, ad un’altra membrana, detta *finestra ovale*, che separa orecchio medio da quello interno. La forma degli ossicini è tale da aumentare la forza trasmessa dal timpano da 1.3 a 3 volte.

Sono presenti anche due muscoli: il muscolo *tensore* del timpano, attaccato al martello, che aumenta l’acuità uditiva, ed il muscolo *stapedio*, attaccato alla staffa, che protegge il sistema da rumori troppo intensi. A causa della lentezza d’azione di quest’ultimo (circa un secondo), non viene garantita una protezione efficace contro i rumori impulsivi.

Orecchio interno

L’orecchio interno (Figura 2.3) è formato da due parti principali: i canali semicircolari, ai quali è preposto il compito dell’equilibrio, e la coclea, che trasforma il segnale di pressione in segnale elettrico da inviare al cervello.

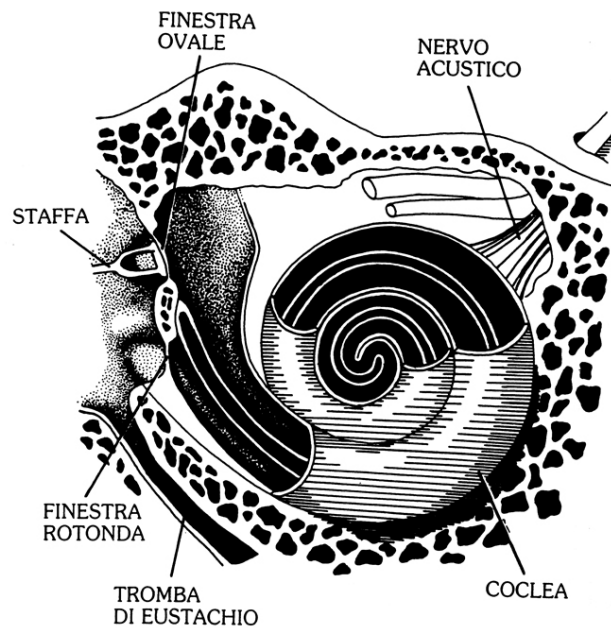



Figura 2.12. Orecchio Interno

La coclea (Figura 2.4) è un canale a forma di chiocciola riempito di liquidi, lungo dai 35 ai 37 mm, con un diametro massimo di 2 mm; è divisa longitudinalmente dal canale cocleare, delimitato dalla memnrana di Reissner e dalla membrana basilare,al cui interno vi è un liquido chiamato endolinfa.

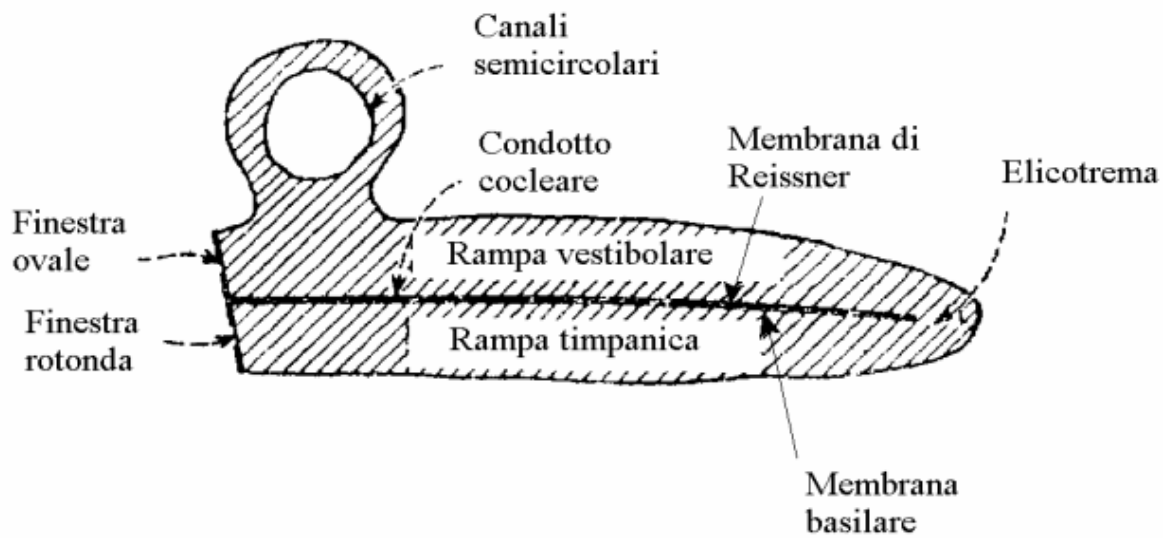



Figura 2.4. Coclea

Il canale cocleare divide la coclea in due sezioni dette rampe: la rampa vestibolare e la rampa timpanica. Questi canali, riempiti di un liquido detto perilinfa, sono in comunicazione tra loro all’apice della coclea tramite un passaggio detto elicotrema.
La rampa vestibolare è separato dall’orecchio medio tramite al finestra ovale, mentre quella timpanica è chiusa dalla finestra rotonda.

Sulla membrana basilare sono appoggiate le cellule cigliate da cui fuoriescono delle ciglia delimitate da una terza membrana, detta membrana tettoria.

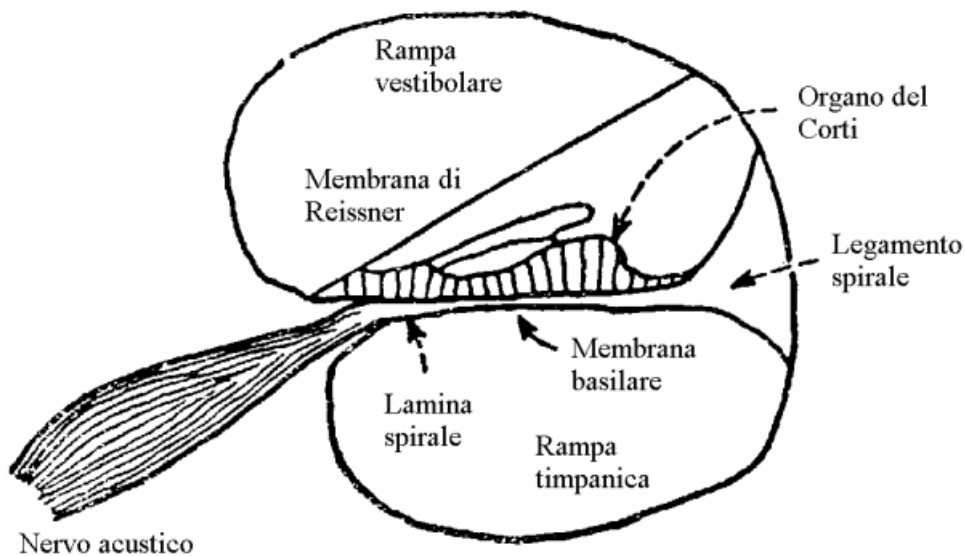



Figura 2.5. Sezione orecchio interno

Quando la staffa sollecita la finestra ovale, questa mette in moto la perilinfa; essendo incomprimibile, tende a deformare il condotto grazie all’elasticità della finestra rotonda, facendo oscillare la membrana basilare. Tale oscillazione sollecita le cellule cigliate che generano un potenziale elettrico variabile che viene inviato al cervello tramite il nervo acustico.

A causa della sua forma, la membrana basilare si presenta più rigida verso la finestra ovale (che sarà quindi eccitata dalle alte frequenze), e più cedevole verso l’elicotrema (che sarà quindi eccitata dalle basse frequenze). Grazie a tale fenomeno il cervello è in grado di discriminare le varie frequenze.

Sensazione uditiva

L'apparato uditivo introduce una ponderazione del livello sonoro dipendente dalla frequenza, ed al segnale così elaborato il cervello attribuisce un certo livello, necessariamente soggettivo, di pressione sonora.

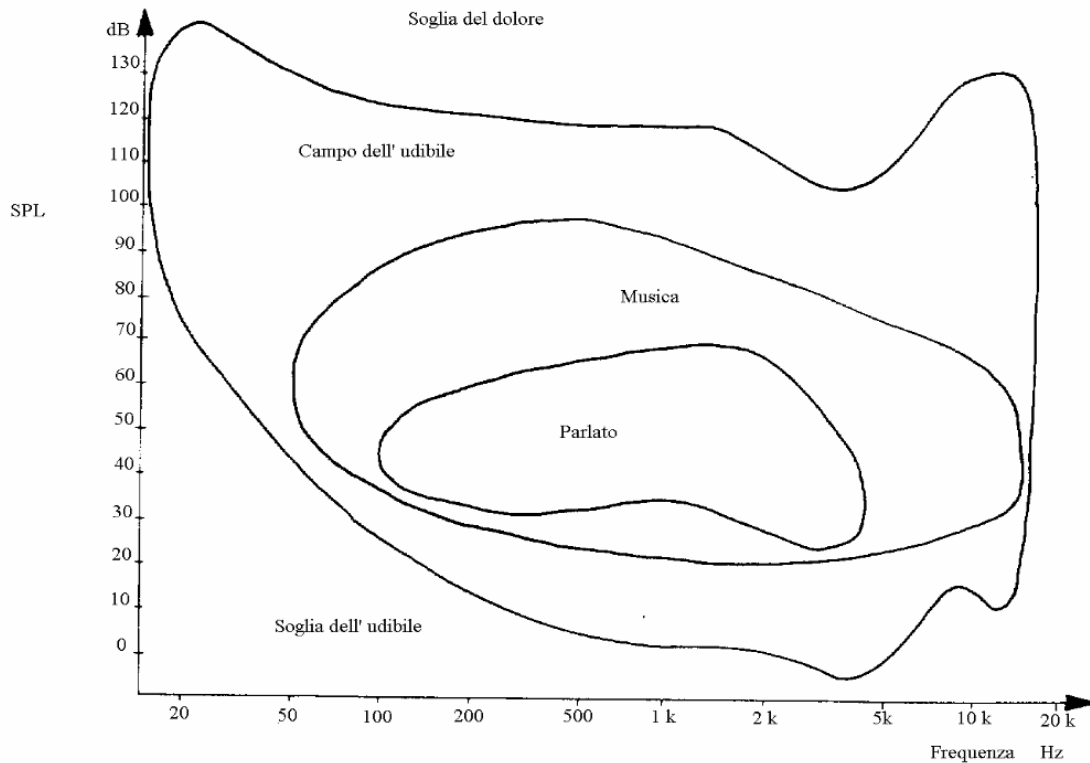



Figura 2.6. Soglie uditive

Il legame empirico tra livelli di sensazioni sonore (espresse in phon) e pressioni sonore è stato studiato da Fletcher, che per primo esaminò il problema basandosi sulla legge Weber-Fechner, la quale afferma che la variazione minima di sensazione rilevabile è proporzionale alla minima variazione relativa dello stimolo. Da questo assunto, Fletcher tentò di ricavare in forma analitiche quelle che poi diventeranno le curve isofoniche, grafici che esprimono la relazione fra pressione sonora e loudness:

$$\Delta s = k \frac{\Delta I}{I}$$

Dove Δs è la variazione di sensazione, k è una costante e I è l'intensità acustica. Supponendo la funzione differenziabile, riuscì a scrivere:

$$s = kLogI + C$$

Considerando la sensazione sonora nulla al valore della soglia udibile I_s , e ponendo k=10, Fletcher potè infine scrivere:

$$s = 10Log\frac{I}{I_s}$$

Fallita però la via analitica, Fletcher ricavò le curve isofoniche per via empirica, effettuando delle prove con toni puri ed avendo come frequenza di riferimento i 1000 Hz.

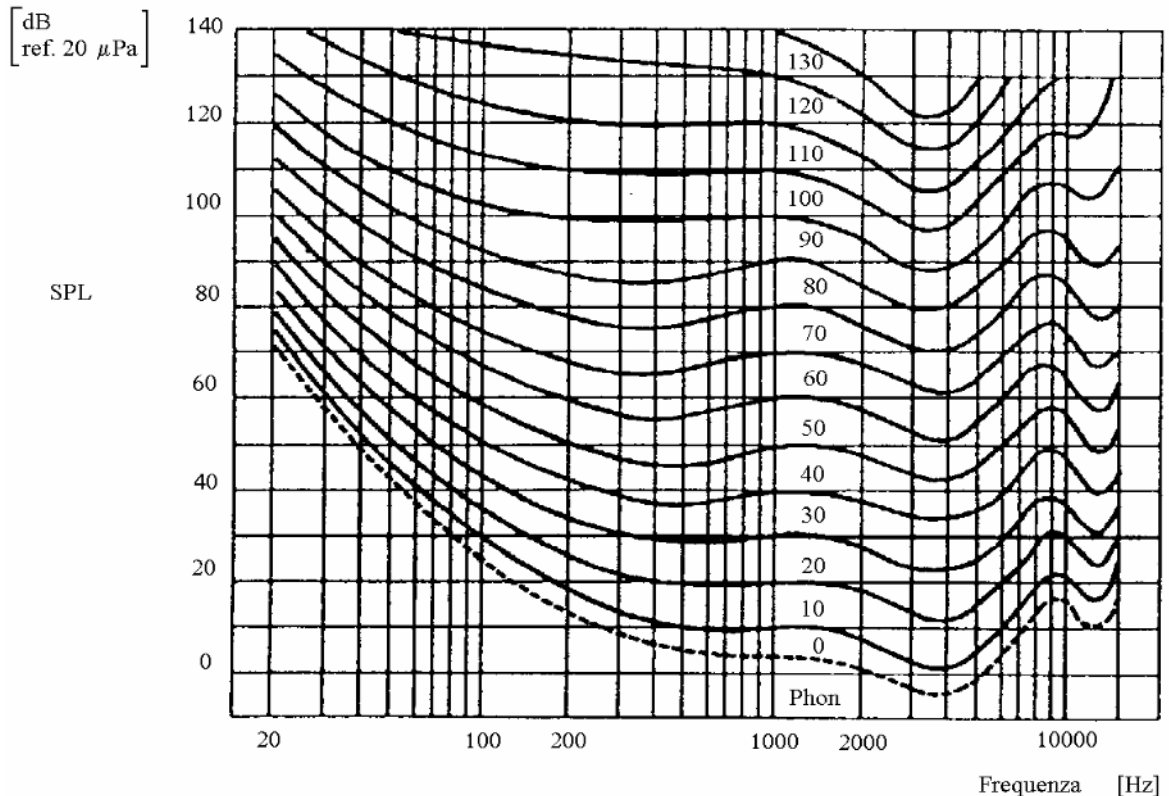



Figura 2.7. Curve Isofoniche

Dal grafico si è potuto notare che l'orecchio umano è particolarmente sensibile alle frequenze medio alte della banda acustica (500-5000Hz), con un massimo di sensibilità intorno 3500 Hz, mentre presenta rapidi cali alle basse ed alle alte frequenze. Va inoltre notato che la scala delle frequenze è logaritmica, come da ipotesi Weber – Fechner.

Va ribadito il fatto che queste curve sono valide solo per toni puri, ascoltati in campo libero, con la sorgente posta frontalmente; per cercare di utilizzarle anche nella pratica nel caso di rumori composti, è stato introdotto il concetto di Son, definito come:

$$S = 2^{\frac{(Phon-40)}{10}}$$

Ma essendo correlato direttamente al Phon, il problema operativo rimane.

Il problema pratico portò ad elaborare quattro curve, dette di ponderazione, così da poter utilizzare i concetti di Fletcher anche nel campo pratico:

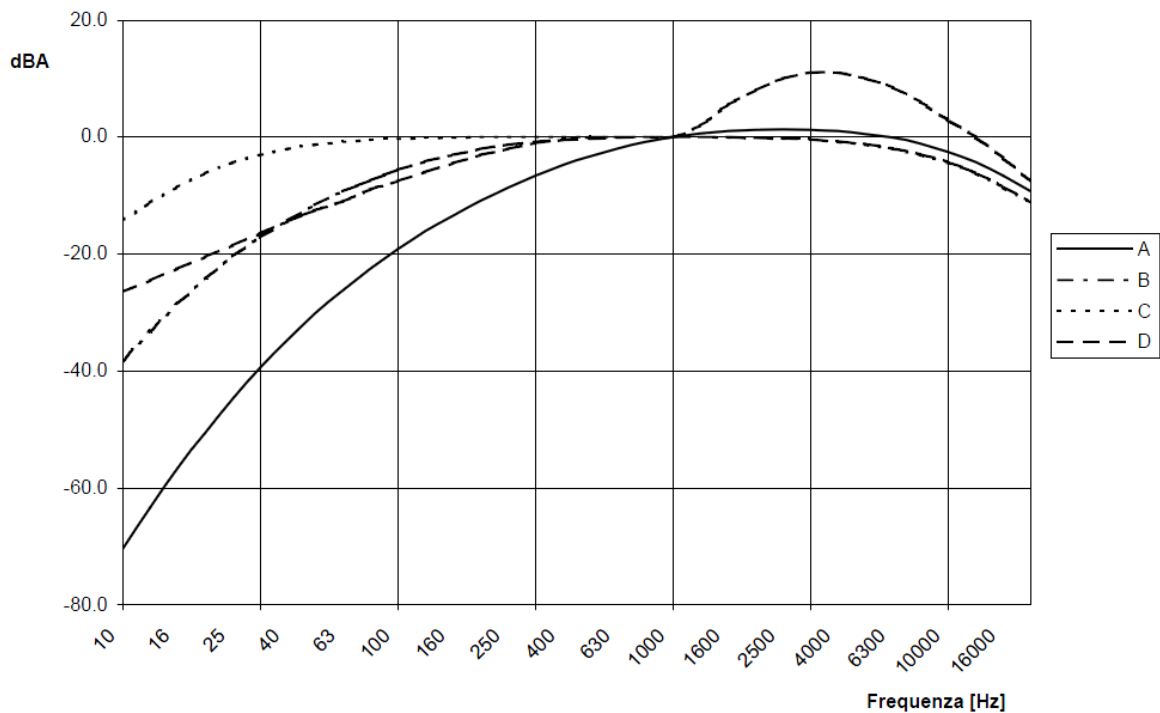



Figura 2.8. Curve di ponderazione

- *Curva A:* corrisponde alla curva isofonica dei 40 phon, viene utilizzata nelle situazioni di uso pratico.
- *Curva B:* corrisponde alla curva isofonica di 70 phon, è entrata in disuso in favore della A.
- *Curva C:* corrisponde alla curva isofonica dei 100 phon,viene impiegata nella valutazione dei disturbi recati da rumori impulsivi isolati.
- *Curva D:* utilizzata per la valutazione dei disturbi recati dai rumori aereonautici.

Di seguito è riportata la tabella relativa alle curve di ponderazione (Tabella 2.1):

Frequenza [Hz]	Curva A [dB]	Curva B [dB]	Curva C [dB]	Curva D [dB]
10	-70.4	-38.2	-14.3	-26.5
13	-63.4	-33.2	-11.2	-24.5
16	-56.7	-28.5	-8.5	-22.5
20	-50.5	-24.2	-6.2	-20.5
25	-44.7	-20.4	-4.4	-18.5
32	-39.4	-17.1	-3.0	-16.5
40	-34.6	-14.2	-2.0	-14.5
50	-30.2	-11.6	-1.3	-12.5
63	-26.2	-9.3	-0.8	-11.0
80	-22.5	-7.4	-0.5	-9.0
100	-19.1	-5.6	-0.3	-7.5
125	-16.1	-4.2	-0.2	-6.0
160	-13.4	-3.0	-0.1	-4.5
200	-10.9	-2.0	0.0	-3.0
250	-8.6	-1.3	0.0	-2.0
315	-6.6	-0.8	0.0	-1.0
400	-4.8	-0.5	0.0	-0.5
500	-3.2	-0.3	0.0	0.0
630	-1.9	-0.1	0.0	0.0
800	-0.8	0.0	0.0	0.0
1000	0.0	0.0	0.0	0.0
1250	0.6	0.0	0.0	2.0
1600	1.0	0.0	-0.1	5.5
2000	1.2	-0.1	-0.2	8.0
2500	1.3	-0.2	-0.3	10.0
3150	1.2	-0.4	-0.5	11.0
4000	1.0	-0.7	-0.8	11.0
5000	0.5	-1.2	-1.3	10.0
6300	-0.1	-1.9	-2.0	8.5
8000	-1.1	-2.9	-3.0	6.0
10000	-2.5	-4.3	-4.4	3.0
12500	-4.3	-6.1	-6.2	0.0
16000	-6.6	-8.4	-8.5	-4.0
20000	-9.3	-11.1	-11.2	-7.5

Tabella 2.5. Valori curve di ponderazione per frequenza

Impatto del rumore sull'uomo

Gli effetti che il rumore causa all'uomo sono divisibili in tre classi:

- *Danno:* ogni alterazione anche parzialmente non reversibile dell'apparato uditivo.
- *Disturbo:* alterazione reversibile delle condizioni psicofisiche dei soggetti esposti al rumore.
- *Fastidio (Annoyance):* fastidio che il rumore provoca sugli individui dovuti alla combinazione di fattori di natura psicologica e sociologica.

La seguente tabella indica la scala di dannosità del rumore sull'uomo (Tabella 2.2):

Gamma di rumore	Livello di pressione acustica [dBA]	Caratteristica del danno uditivo
α	0 - 35	Rumore che non arreca né fastidio né danno
β	36 - 65	Rumore fastidioso e molesto, che può disturbare il sonno e il riposo
γ	66 - 85	Rumore che disturba e affatica, capace di provocare danno psichico e neurovegetativo e in alcuni casi danno uditivo
δ	86 - 115	Rumore che produce danno psichico e neurovegetativo, che determina effetti specifici a livello auricolare e che può indurre malattia psicosomatica
ε	116 - 130	Rumore pericoloso: prevalgono gli effetti specifici su quelli psichici e neurovegetativi
ξ	131 - 150 e oltre	Rumore molto pericoloso: impossibile da sopportare senza adeguata protezione; insorgenza immediata o comunque molto rapida del danno

Tabella 2.6. Relazione livello rumore – dannosità

Il rumore ammissibile imposto dalle normative varia a seconda del tipo di luogo, ed è calcolato basandosi su calcoli probabilistici; questo significa, ad esempio, che se un luogo di lavoro ha un'esposizione giornaliera al rumore al di sotto degli 80 dB, questo non significa che sotto questo limite non si abbia un danno uditivo col passare degli anni, ma che la probabilità che questo accada è molto bassa.

Forti livelli di rumorosità non agiscono solo sull'apparato uditivo, ma anche sul sistema cardiovascolare, sul sistema nervoso centrale, sull'apparato respiratorio, sull'apparato digerente ed in generale su tutto il corpo.

Capitolo 3

Confort Acustico

Per confort acustico s’intende quella condizione psicofisica di benessere nella quale si trova un individuo immerso in un campo sonoro, in relazione all’attività che sta svolgendo.

Il concetto è molto soggettivo, legato ad esigenze personali o a particolari sensibilità individuali; tuttavia esistono alcuni indici che, riferiti a diverse condizioni di ascolto, permettono di valutare differenti aspetti della percezione sonora.

Relativamente alla qualità acustica degli ambienti esistono dei concetti generali da seguire nella progettazione, quali l’assenza del disturbo, cioè la riduzione di qualsiasi rumore di fondo, e la buona ricezione, condizione indispensabile affinché si arrivi ad una condizione ottimale di intelligibilità della parola. Quest’ultima è raggiunta tramite un compromesso fra suono diretto ed onde riflesse, in modo tale che quest’ultime possano contribuire al rinforzo del primo senza però creare una coda sonora troppo lunga che mascheri i segnali successivi; fondamentale per una buona ricezione è dunque lo studio del tempo di riverbero.

L’effetto Lombard e l’intelligibilità del parlato

La voce umana presenta fluttuazioni di livello di pressione sonora molto ampie, dell’ordine di 30 dB; i suoni vocalici sono di durata maggiore e più intensi rispetto a quelli consonantici che possono essere anche muti e assumere caratteristiche impulsive; ai fini dell’intelligibilità è quindi importante verificare che le caratteristiche acustiche dell’ambiente (in particolare nelle frequenze comprese fra i 300 e i 3kHz) siano tali da non aumentare la durata dei suoni vocalici al punto da mascherare i fonemi consonantici.

Per intelligibilità s’intende la percentuale di parole o frasi correttamente comprese da un ascoltatore rispetto alla totalità delle frasi pronunciate da un parlatore; essa dipende ovviamente dal rumore di fondo, dal riverbero della stanza, dalle caratteristiche della voce umana, dall’intensità di emissione, dalla direttività della sorgente del parlatore, oltre che da fattori di natura linguistica.

In generale il parlatore adatta l’intensità della propria voce proporzionalmente a come lui stesso percepisce il livello di pressione sonora dell’ambiente che lo circonda; ad esempio, in presenza di un rumore di 50dBA, un parlatore normoudente solitamente aumenta l’intensità della propria voce da 3 a 6dB per ogni incremento di 10dB del rumore mascherante il messaggio verbale.
Tale fenomeno è definito come effetto Lombard, ed esprime la relazione fra il livello sonoro del parlato L_s (cioè lo sforzo di chi parla), ed il rumore di fondo L_n. Poiché negli ambienti pubblici (come ristoranti, bar, uffici) è il parlatore stesso che contribuisce con il suo parlare a creare rumore di fondo, risulta immediatamente chiaro come sforzo vocale e rumore ambientale siano strettamente legati fra loro; più il rumore di fondo è alto, più una persona tenderà a sforzare la propria voce per garantire chiarezza al discorso, portando il suo corpo ad incrementare il proprio stress psicofisico.

Intensità della voce	Livello di pressione sonora $L_{S,A,1m}$ dB(A)
Bassa	54
Normale	60
Sostenuta	66
Forte	72
Urlata	78

Tabella 3.7. Relazione sforzo vocale/livello sonoro per un parlatore posto ad 1m dal suo ascoltatore

La precedente tabella (Tabella 3.1) mette in relazione lo sforzo vocale sostenuto da un parlatore posizionato a 1m di distanza dal proprio ascoltatore con il livello di pressione sonora generata ponderata A.

E' importante inoltre puntualizzare come la voce urlata risulti più difficile da comprendere a causa di importanti modifiche nella fonazione e nell'intonazione che intervengono per livelli superiori a 75dBA; qualora si ecceda tale limite, il livello di pressione sonora del messaggio verbale ($L_{s,A}$) viene ridotto di una quantità $\Delta L = 0.4(L_{s,A} - 75)dB$nel calcolo dei descrittori dell'intelligibilità del parlato che verranno presentati nel prossimo paragrafo.

Un ulteriore fattore da considerare è la distanza fra parlatore e ascoltatore: più aumenta, peggiore diventa l'intelligibilità del messagio.
In particolare, in ambienti aperti o chiusi, il livello del messaggio verbale nella posizione dell'ascoltatore $L_{S,A,L}$ è dato da:

$$L_{S,A,L} = L_{S,A,1m} - 20Log\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

Dove r in metri è la distanza fra parlatore e ascoltatore, r_0=1m, $L_{S,A,L}$ e lo sforzo vocale del parlatore se fosse ad una distanza di un metro dall'ascoltatore; tale relazione vale per $r \leq 8$m e per ambienti poco riverberanti ($RT60 < 2$s a 500 Hz).

Livello di rumore nell'ambiente dB(A)	Distanza preferibile Ascoltatore-parlatore (m)
45	0,85
55	0,65
65	0,5
75	0,4

Tabella 3.8. Relazione tra rumore ambientale e distanza minima fra parlatore e ascoltatore

La tabella (Tabella 3.8) mostra i valori preferibili della distanza minima fra chi parla e chi ascolta, a seconda del rumore ambientale, per avere una conversazione a livello di voce normale e parlatore frontale.

Indici di intelligibilità

Assicurare un buon livello d'intelligibilità è fondamentale non solo nei luoghi di lavoro, ma anche in quelli comunitari. Per valutare l'intelligibilità del parlato in un ambiente occorrerebbe procedere ad una serie di test soggettivi utilizzando frasi o parole preselezionate secondo protocolli sperimentali descritti nella norma UNI EN ISO 9921:2004.
Più frequentemente si ricorre a descrittori oggettivi agevolmente calcolabili e misurabili:

- *SNR:* rapporto tra segnale e rumore; è definito come differenza in decibel fra il livello della voce umana e quello del rumore di fondo presente nell'ambiente SNR=L_s-L_n. All'aumentare di tale indice, sono stati osservati una tendenza da parte degli interlocutori ad ottimizzare la propria posizione, portandosi più vicini l'uno all'altro, ed un aumento dello sforzo vocale.

- *Speech Interference Level (SIL):* metodo applicabile in ambienti poco riverberanti ($RT60 < 2$s a 500Hz) e in assenza di sistemi di amplificazione e trasmissione della voce. Il livello di interferenza sul parlato L_{SIL} è definito come la media aritmetica del livello di pressione del rumore di fondo (in assenza quindi del messaggio verbale) nella posizione dell'ascoltatore in corrispondenza delle quattro bande di frequenza centrata attorno ai 500, 1k, 2k, 4k Hz. Nelle situazioni più frequenti si può ritenere valida la relazione $L_{SIL} = L_A - 8$ dB, essendo L_A il livello di pressione sonora dell'ambiente in dBA. L'indice SIL è dato quindi da:

$$SIL = L_{S,A,L} - L_{SIL}$$

  con $L_{S,A,L}$ definito come nel paragrafo precedente, cioè il livello del messaggio verbale nella posizione dell'ascoltatore. Tale indice deve assumere valori superiori a 10 dB affinché sia garantita un'intelligibilità accettabile.

- *Chiarezza (C50):* indice ottenuto dal logaritmo del rapporto fra energia del suono utile ed energia del suono disturbante:

$$C50 = 10Log\frac{\int_0^{50ms} p^2(t)dt}{\int_{50ms}^{+\infty} p^2(t)dt}$$

  dove $p^2(t)$ è l'energia del suono. Gli intervalli di tempo sono scelti stimando come suono utile al trasferimento dell'informazione quello che avviene nei primi 50ms (in caso di segnale musicale si considerano i primi 80ms).
  Valori di chiarezza intorno ai 1dB e 2dB indicano un campo sonoro chiaro e molto chiaro, mentre valori negativi intorno ai -1dB e -2dB indicano un campo sonoro poco chiaro; in generale è bene avere valori compresi fra -2 e 2dB.

- *Speech Transmission Index (STI):* quantifica l'effetto combinato dell'interferenza del rumore di fondo e della riverberazione sull'intelligibilità del parlato. Si basa sulla considerazione che la voce umana, la cui intensità varia nel tempo, può essere considerata come un segnale modulato in ampiezza tra i 500 e i 1,6kHz.
  La voce rimane comprensibile se percepita in condizioni tali da mantenere invariate le sue caratteristiche di modulazione, esprimibili tramite l'indice di modulazione

$$m_{f,F} = \frac{\int_0^\infty e^{-j2\pi Ft} i^2(t)dt}{\int_0^\infty i^2(t)dt} \frac{1}{(1 + 10^{-\frac{SNR_f}{10}})}$$

  Dove i(t) è la risposta all'impulso, f è la frequenza centrale della banda di ottava considerata, F è la frequenza modulante. Nel caso di campo sonoro diffuso, per distanze dalla sorgente molto maggiore della distanza critica, l'indice di modulazione diventa:

$$m_{f,F} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\pi FT_f}{13.8}}} \frac{1}{1 + 10^{\frac{SNR_f}{10}}}$$

  Dove T_f è il tempo di riverbero alla frequenza centrale f, SNR_f è il rapporto segnale rumore descritto precedentemente.
  La misura dell'indice STI, avente valori compresi fra 0 e 1, consiste, pertanto, nel determinare la riduzione dell'indice di modulazione di un segnale di prova lungo il percorso emissione-ricezione. A tale scopo s'impiega una specifica sorgente sonora collocata nella posizione del parlatore e sono disponibili sistemi automatici della misurazione dello STI.

- *Speech Intelligibility Index (SII):* evoluzione dell'indice di articolazione AI, il quale è basato sul presupposto che la risposta di un sistema di comunicazione verbale possa essere suddivisa in 20 bande, ciascuna recante uno specifico contributo all'intelligibilità, e che il totale di quest'ultima sia pari alla somma dei contributi parziali delle singole bande.
  I valori sono compresi fra 0 (intelligibilità nulla) e 1 (intelligibilità perfetta). In linea generale ad ogni raddoppio della distanza ascoltatore-parlatore si ha una riduzione dell'indice di circa 0.15 (stessa riduzione si registra per una rotazione di 90° dell'ascoltatore rispetto a chi parla); una diminuzione di 5dBA per il rumore di fondo, comporta, a parità di altri fattori, un aumento di 0.17 dell'indice SII.
  La formula dell'indice è la seguente:

$$SII = \sum_f i_f a_f$$

Dove i_f rappresenta il fattore di importanza dipendente dalla frequenza f (Frequency Important Function FIF) la cui somma in tutto lo spettro è 1, mentre a_f, variabile tra 0 e 1, rappresenta la porzione udibile del parlato nelle varie frequenze f.

A norma di legge è stata redatta una tabella di corrispondenza fra i vari indici di intelligibilità (Tabella 3.2):

Intelligibilità	Nulla	Cattiva	Scarsa	Accettabile	Buona	Eccellente
SIL dB		< 3	3÷10	10÷15	15÷21	> 21
STI	0	< 0,30	0,30÷0,45	0,45÷0,60	0,60÷0,75	> 0,75
AI	0	0,1	0,2÷0,3	0,4÷0,5	0,6÷0,7	> 0,7
SII			< 0,45		> 0,75	

Tabella 3.9. Riferimenti di intelligibilità

Confort acustico nei locali di ristorazione

Per una buona comunicazione in un ristorante bisogna garantire una buona intelligibilità al tavolo unita ad una buona privaci fra i tavoli.
Per raggiungere tale obbiettivo è necessario intervenire sul tempo di riverbero, che deve essere minore di 0.6s per frequenze medie, e sulla diminuzione del rumore di fondo, ottenibile anche lavorando sulla densità di occupazione o sulla tipologia di clientela o utilizzando degli schermi acustici.

Per ciò che riguarda la densità di occupazione, è bene ricordare che, per tempi di riverbero ottimale, è consigliabile avere 0.42 persone/m^2 per clientela composta da soli adulti e 0.38persone/m^2 nel caso di famiglie; è necessario inoltre considerare l’effetto Gardner, secondo il quale raddoppiando il numero di persone in un ambiente il rumore incrementa di 6dB. In linea generale, più è basso il tempo di riverbero più è possibile aumentare la densità di occupazione del locale.

In questo esempio (Figura 3.1), nonostante l’ottimo tempo di riverbero che garantisce una buona intelligibilità, la cattiva disposizione dei tavoli porta ad avere una troppo alta densità di occupazione che causa uno sforzo vocale troppo elevato e di conseguenza un aumento del livello di pressione sonora.

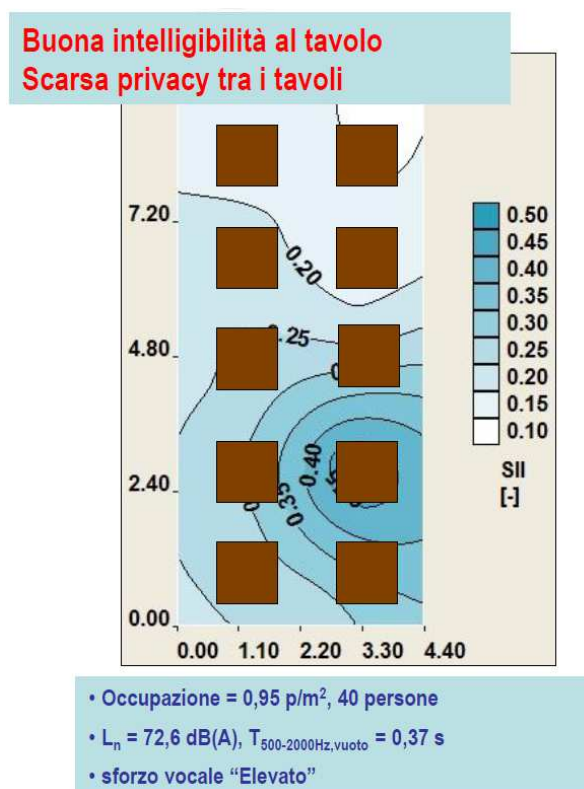



Figura 3.1. Scarsa privacy dettata da una non corretta disposizione dei tavoli

In questo secondo caso (Figura 3.2) viene migliorata la disposizione dei tavoli, il che porta ad avere una minore densità di occupazione e una conseguente diminuzione dello sforzo vocale, oltre che una riduzione del livello di pressione sonora.

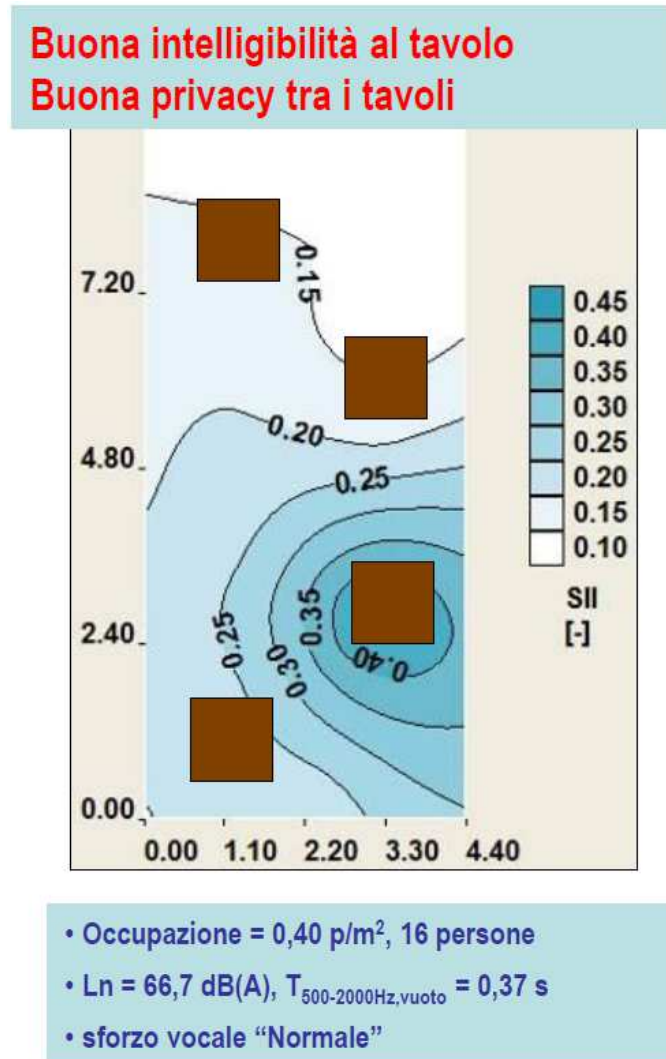



Figura 3.2. Buona intelligibilità e privacy dettata da una buona disposizione dei tavoli

Caso Pratico: Ristorante Barracudino

Il locale ha un area calpestabile di circa 129.53m^2, con un numero di tavoli uguale a 20, solitamente disposti come in figura:

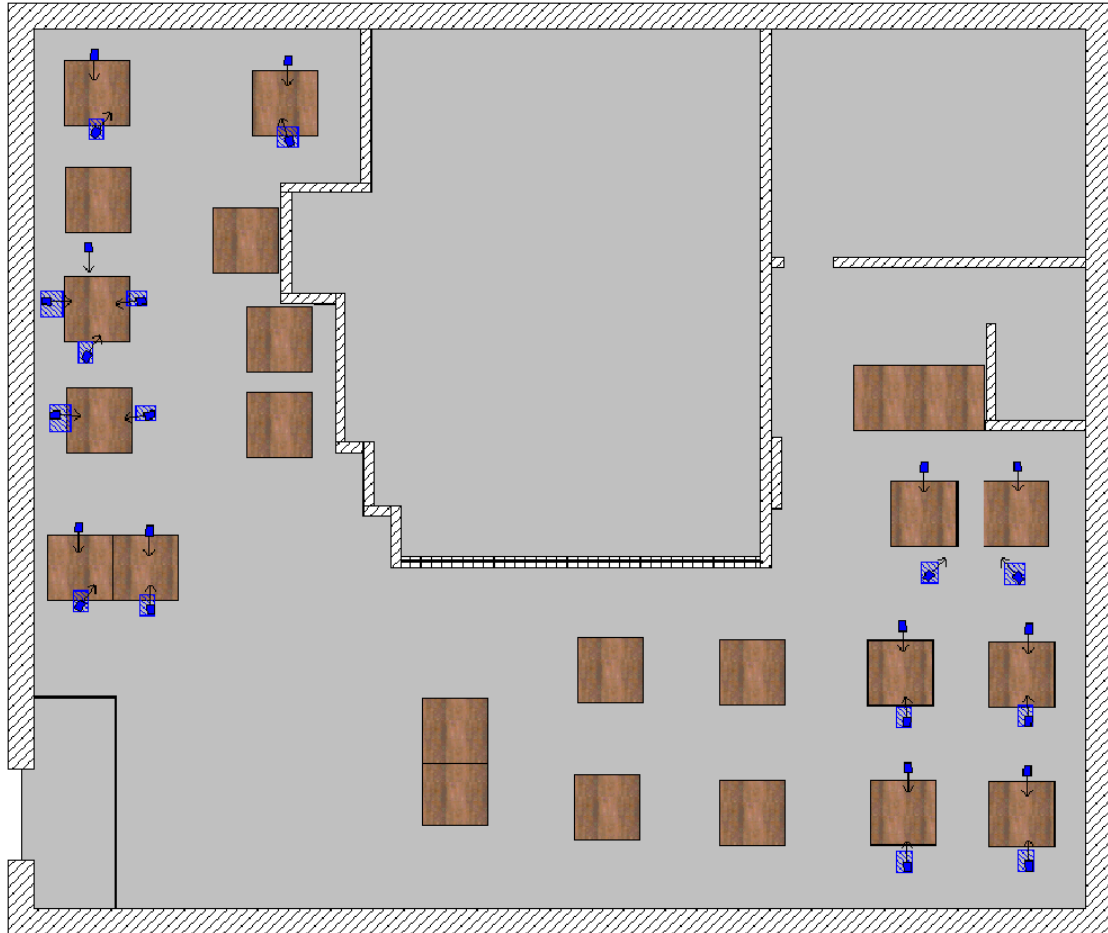



Figura 3.3. Pianta Ristorante Barracudino Easy&Chic

I tavoli sono divisi in:

- Due tavoli da 6 persone
- Otto tavoli da 2 persone
- Undici tavoli da 4 persone

Per un totale di 70 persone contenibili. La densità risulta dunque essere pari a 0.525persone/m^2, ben più alta rispetto a quella consigliata.

Questo dato è aggravato dai rilievi sul tempo di riverbero relativo alle frequenze medie (Tabella 3.10):

Freq (Hz)	T60
400	1,1325
500	1,21875
630	1,27375
800	1,26375
1000	1,23125
1250	1,18
1600	1,17125
2000	1,1875
2500	1,065
3150	0,945
4000	0,97875
5000	0,89
6300	0,7475
8000	0,6875

Tabella 3.10. Tempi di riverbero per le frequenze medie

E’ quindi ovvio che il primo intervento da fare è di fonoassorbimento, così da ridurre il tempo di riverbero e permettere una più alte densità di persone ammissibile.

Capitolo 4

Misuratori del livello sonoro

Analisi in frequenza

Nell'analisi dei rumori casuali interessa anche determinare le intensità acustiche nelle diverse bande di frequenza. Per questo motivo vengono utilizzati filtri a larghezza di banda costante di un'ottava od un terzo di ottava (Figura 4.1).

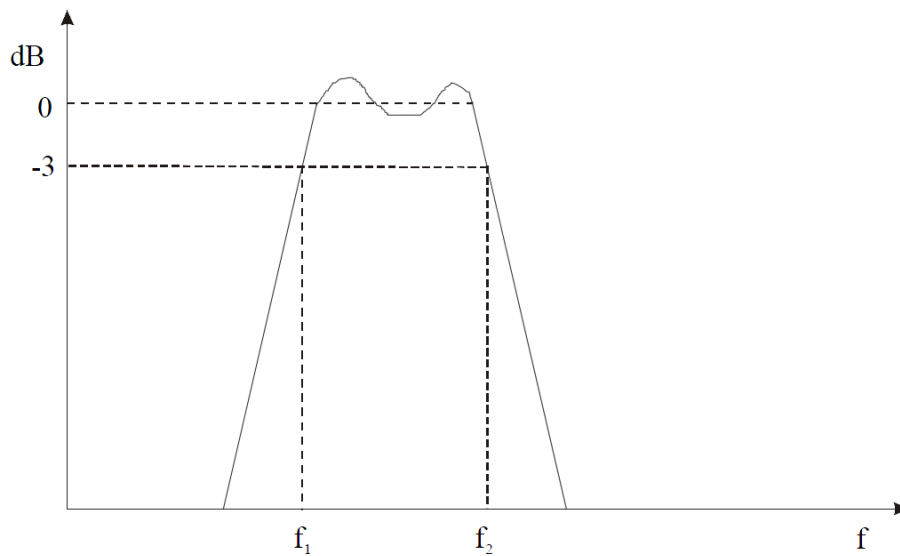



Figura 4.13. Esempio di filtro in banda f_1 - f_2

Le bande hanno un'ampiezza relativa costante, in quanto simulano il comportamento dell'orecchio umano. Le caratteristiche di questi filtri sono riportati in Tabella 4.1.

	Ottava	Terzi d'ottava
Rapporto tra le frequenze di taglio f_2/f_1	2	$2^{\frac{1}{3}} = 1.259$
Frequenza centrale $f_c = \sqrt{f_1 f_2}$	$f_c = \sqrt{2} f_1$	$f_c = 1.122 f_1$
Larghezza di banda percentuale $\frac{f_2 - f_1}{f_c} 100$	70.7 %	23.1 %

Tabella 4.11. Caratteristiche filtri in banda di ottava e terzi di ottava

Nelle moderne normative si prevede ormai l'utilizzo quasi esclusivo di filtri di terze di ottava.

Fonometro

Strumenti atti a trasformare la pressione sonora in segnale elettrico, da elaborare successivamente in modo opportuno al fine di ottenere gli indici descrittori del livello di rumore.

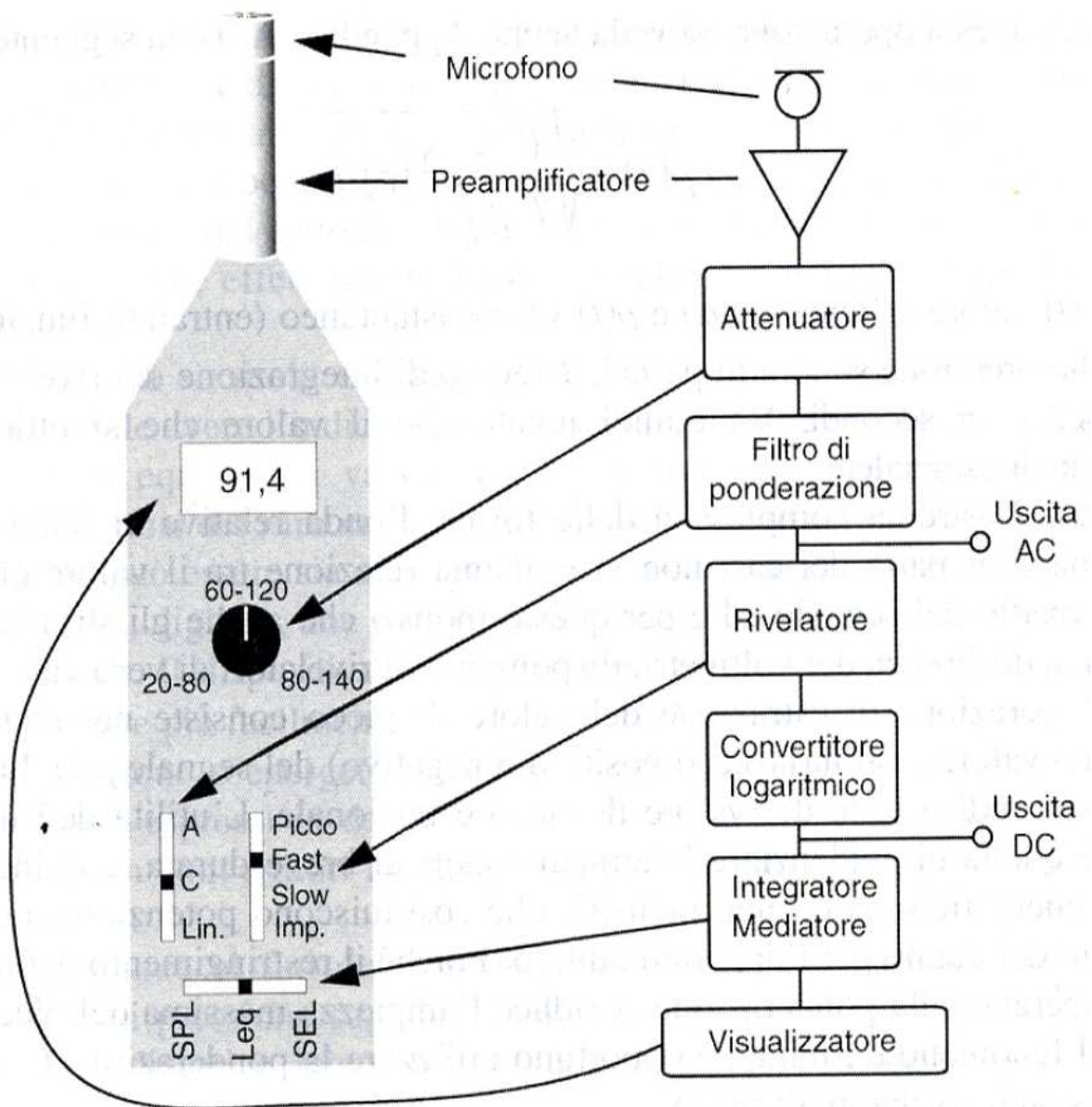



Figura 4.2. Schema a blocchi di un fonometro

Il fonometro è composto, in generale, dai seguenti componenti:

- *Microfono-Preamplificatore-Attenuatore:* la pressione sonora viene convertita in segnale elettrico che successivamente viene amplificato; questo segnale viene poi riportato entro una delle tre scale (da 20 a 80, da 60 a 120, da 80 a 140) dall’attenuatore.

- *Filtro di ponderazione:* ponderazione in frequenza del segnale secondo una delle curve normalizzate (A e C), oppure restituzione lineare (Lin.).

- *Uscita AC:* possibilità di prelievo del segnale dall’uscita in corrente alternata, per eventuali elaborazioni più complesse.

- *Rivelatore:* Scelta della costante di tempo per rettificare il segnale in modo che all’uscita di questo blocco si abbia il suo valore RMS (Root Mean Square). La scelta delle costanti di tempo varia tra Picco (100μs), Fast (0.125s), Slow (1s), Impulse (0.035s); maggiore è la costante di tempo, minore sarà la pendenza della curva. La scelta della costante di tempo viene normalmente imposta dalle normative vigenti.

- *Convertitore logaritmico:* Utilizzato per le valutazione del livello sonoro nel blocco successivo.

- *Uscita DC:* possibilità di prelievo del segnale elaborato dall’uscita in corrente continua, per eventuali registrazioni.

- *Integratore Mediatore:* integrazione del segnale nel tempo; tre le possibili scelte:

  - SPL (Sound Pressure Level) L_p , calcolato secondo l’equazione conosciuta.

$$L_p = 20Log(\frac{p_e}{p_0})$$

  - Livello di pressione sonora equivalente secondo la curva di ponderazione A nel periodo T.

$$L_{Aeq} = 10Log(\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{T} 10^{\frac{L_{p_i}}{10}})$$

  - SEL (Sound Exposure Level), che esprime il livello che verrebbe misurato se tutta l’energia sonora associata al rumore di durata T venisse concentrata in un secondo.

$$SEL = 10Log(\frac{1}{\Delta t_0}\sum_{t=1}^{T} 10^{\frac{L_{Aeq_i}}{10}})$$

- *Visualizzatore:* Display per visualizzare il risultato.

In alcuni fonometri è incluso anche un analizzatore di spettro in bande di ottava o terze di ottava.

Analisi dei risultati e possibili correzioni

Una volta fatte le misurazione è bene applicare delle opportune correzioni in base a specifiche considerazioni.

$$L_{p_{tot}} = L_p + C_{imp} + C_{ton} + C_{ton_lf}$$

- *Componente Impulsiva (C_{imp}):* si evidenzia la presenza di un evento impulsivo nel caso di evento sonoro ripetitivo, di durata minore di 1s, tale per cui $L_{p_{imp}} - L_{p_{segnale}} = 6db$; in questo caso è bene correggere il valore del livello di pressione sonora L_p aggiungendo 3dB (C_{imp}=3dB).

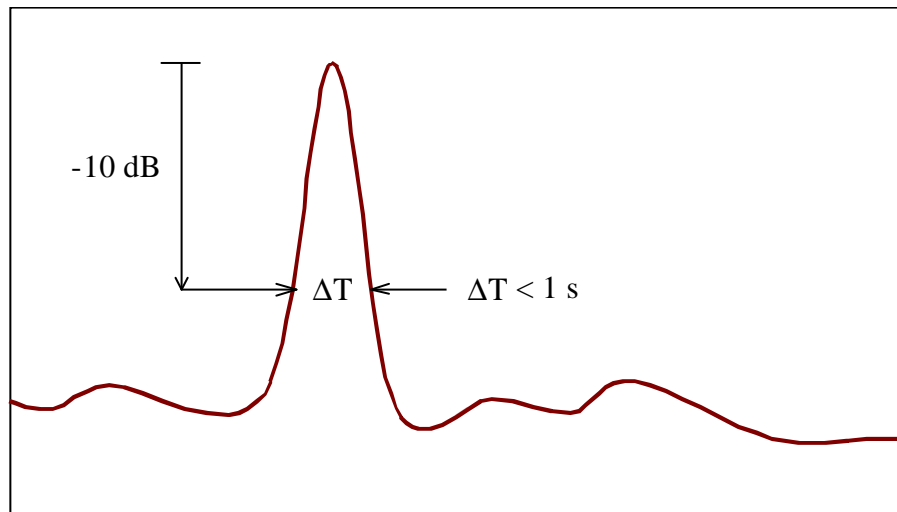



Figura 4.14. Evento Impulsivo

- *Componente Tonale (C_{ton}):* nel caso in cui il livello di pressione sonora di una banda superi le adiacenti per 5dB, e lo stesso eguagli o superi l'isofonica più elevata raggiunta dalle altre componenti, si evidenzia la presenza di una componente tonale, per cui è bene correggere il valore del livello di pressione sonora L_p aggiungendo 3dB(C_{ton}=3dB).

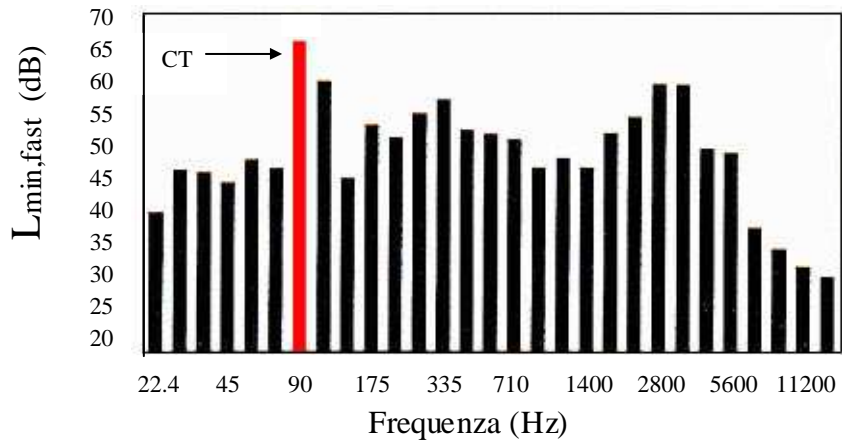



Figura 4.15.Componente Tonale

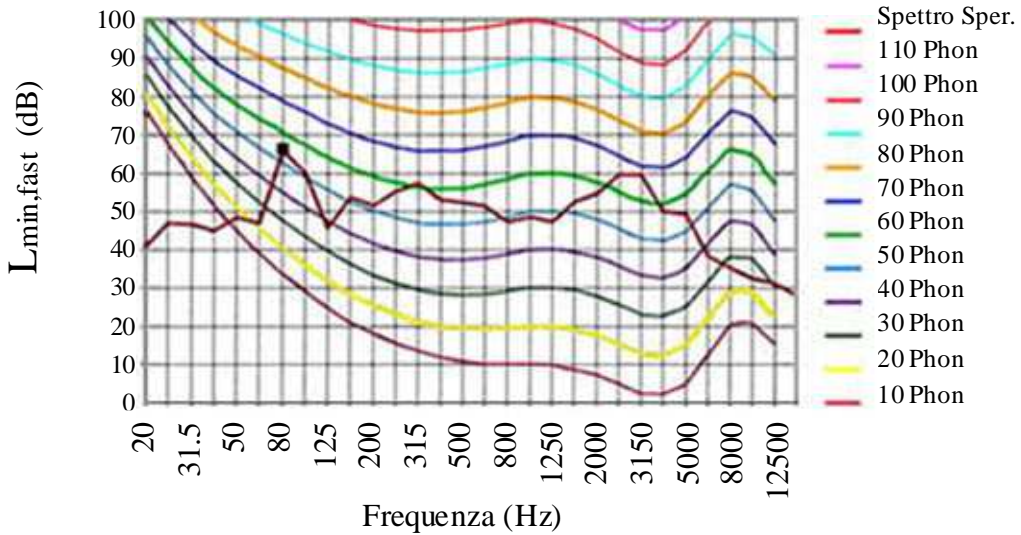



Figura 4.16. Curve Isofoniche

In questo esempio, sebbene la componente ai 90 Hz superi le adiacenti di 5 dB, osservando l'isofonica, si nota che non supera la curva dei 60 Phon, cioè la più alta raggiunta dal segnale; di conseguenza la componente ai 90 Hz non è tonale.

- *Componente tonale a bassa frequenza (C_{ton_lf}):* nel caso in cui vi è una componente tonale compresa fra i 20 e i 200Hz, solo nel periodo notturno è necessario fare una correzione di 3dB del valore del livello di pressione sonora(C_{ton_lf}=3dB).

Capitolo 5

Fonoassorbimento e Fonoisolamento

A seconda del tipo di intervento acustico da effettuare, si utilizzano materiali differenti: nel caso si voglia diminuire il volume sonoro o il tempo di riverbero, si utilizzeranno materiali fonoassorbenti; qualora si voglia diminuire il rumore trasmesso all’esterno si adopereranno materiali isolanti.
Dal punto di vista fisico i due materiali sono completamente differenti, e per questo non sono, in genere, intercambiabili.

Sistemi Fonoassorbenti

Caratteristica principale è quello di avere coefficienti di assorbimento apparente in tutta la gamma di frequenze.

Nella realtà non è così, quindi si utilizza la combinazione di diversi materiali

Materiali Porosi

Rientrano in questa categoria le fibre di vetro, le lane minerali,il poliuretano a cella aperta e il polistirolo espanso. Sono i materiali fonoassorbenti usati per la maggiore poiché di basso costo e facilmente installabili.

Il fenomeno dell’assorbimento in questi materiali è dovuto alle vibrazioni dell’aria nelle porosità e negli interstizi che l’onda sonora mette in atto. Le caratteristiche di tali materiali sono diverse:

- *Porosità:* definita come rapporto fra il volume occupato dai pori e il volume totale. L’assorbimento acustico cresce all’aumentare della porosità.

- *Spessore:* condiziona l’entità dell’energia sottratta all’onda incidente. In prossimità di una parete rigida, il primo punto corrispondente al massimo della velocità di pressione delle particelle si trova ad una distanza $d = \frac{\lambda}{4}$, per poi diminuire fino a raggiungere valore nullo a $\frac{\lambda}{2}$ (Figura 5.1). Di conseguenza l’assorbimento sarà massimo per uno spessore di materiale posto intorno a $\frac{\lambda}{4}$ m.

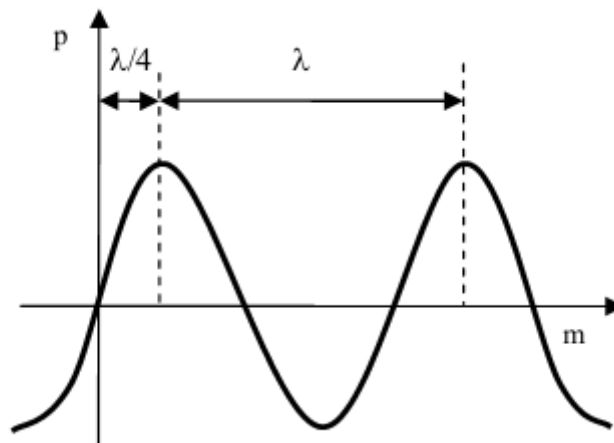



Figura 5.17. Andamento pressione sonora

Poiché per frequenze basse si dovrebbero utilizzare materiali con spessori troppo elevati, si usa interporre un’intercapedine d’aria tra la superficie da trattare e il pannello fonoassorbente, il quale dovrà essere posizionato ad una distanza pari a $\frac{\lambda}{4}$ m.

In tal modo il pannello si comporterà pressoché come uno strato dello stesso materiale di spessore pari a quelle del pannello stesso più l’intercapedine.

Di seguito (figura 5.2), si può osservare il grafico della relazione fra spessore del pannello e capacità di assorbimento:

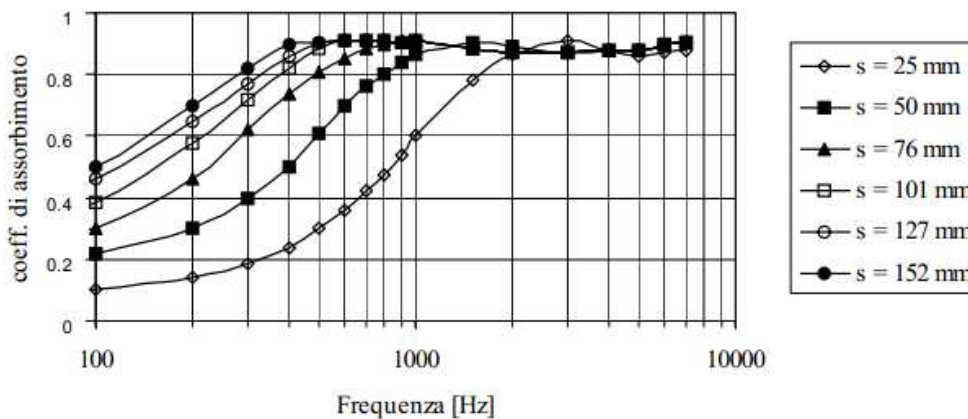



Figura 5.18. Relazione fra spessore del pannello e capacità di assorbimento

Dal grafico si nota che il coefficiente di assorbimento ha andamenti diversi a seconda degli spessori, rimanendo poi essenzialmente costante dopo una certa frequenza.

- *Densità:* per migliorare l’assorbimento delle medio-basse frequenze è consigliabile utilizzare materiali con maggiore densità come poliuretano espanso o lane minerali.

- *Forma:* per favorire la dissipazione dell’energia sonora, la soluzione più diffusa è quella di ricoprire un lato del materiale con protuberanze a forma piramidale.

I materiali porosi sono indicati per l’assorbimento delle frequenze medio-alte; la caratteristica del materiale da utilizzare rimarrà comunque legata all’intervallo di frequenze su cui operare, nondimeno all’uso che della sala si vuole fare.

Di seguito si riporta una tabella relativa al coefficiente di assorbimento in funzione della frequenza (tabella 5.1):

Materiali	Coefficiente di assorbimento apparente in funzione della frequenza [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Lana di vetro media densità s= 25 mm	0.10	0.35	0.60	0.70	0.75	0.80
Lana di vetro media densità s= 50 mm	0.20	0.45	0.65	0.75	0.80	0.80
Lana di vetro media densità s= 100 mm	0.45	0.75	0.80	0.85	0.95	0.90
Lana di vetro media densità s= 150 mm	0.55	0.90	0.90	0.85	0.90	0.95
Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte s=25 mm	0.15	0.30	0.60	0.75	0.85	0.90
Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte s=50 mm	0.25	0.50	0.85	0.95	0.90	0.90
Schiuma di poliuretano espanso a cellule aperte s=100 mm	0.50	0.70	0.95	1.00	1.00	1.00
Polistirolo espanso posato sospeso	0.40	0.40	0.45	0.45	0.50	0.50
Moquette a pelo raso s=6 mm	0.05	0.05	0.10	0.20	0.45	0.65
Moquette a pelo medio s=10 mm	0.05	0.10	0.30	0.50	0.65	0.70
Moquette a pelo alto s=15 mm	0.15	0.25	0.50	0.60	0.70	0.70
Velluto pesante da 610 g/m^2	0.14	0.35	0.55	0.72	0.70	0.65

Tabella 5.12. Coefficiente di assorbimento dei materiali in funzione della frequenza

Esempi di materiali porosi

ACUSTEC-N

Pannello per controsoffitti in lana minerale prodotto da Acùstica Integral.

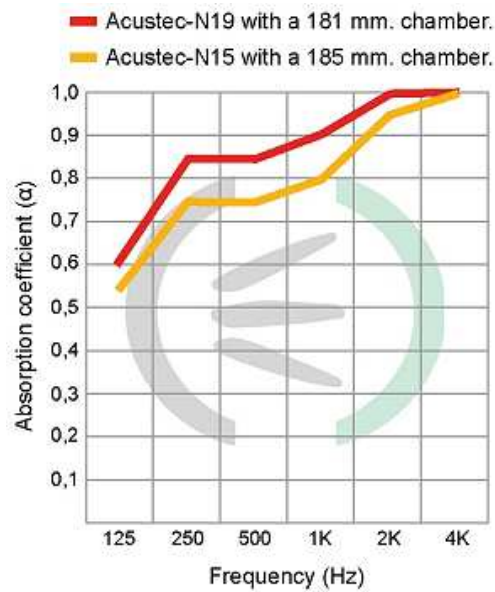



Figura 5.19. Foto e funzione di assorbimento Acustec-N

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,55	0,75	0,75	0,8	0,95	1
α	0,6	0,85	0,85	0,9	1	1

Tabella 5.13. Coefficiente di assorbimento di Acustec-N in base alla frequenza

ACUSTIART D

Pannelli acustici in fibra di poliestere prodotti da Acùstica Integral. Sono studiati per aumentare il confort acustico in abitazioni con controsoffitti e pannelli fonoassorbenti difettosi.

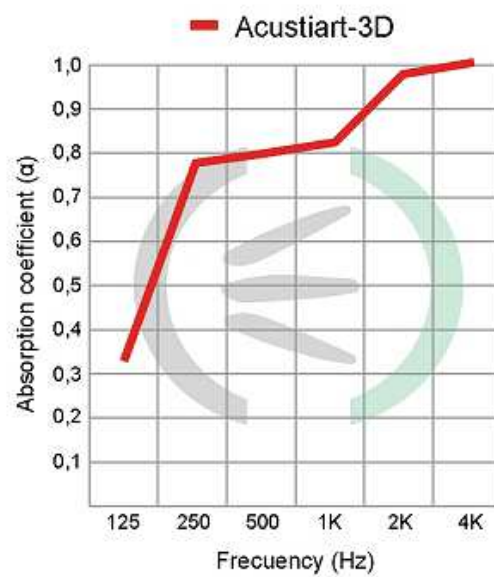



Figura 5.20. Foto e funzione di assorbimento Acustiart-3D

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,34	0,79	0,8	0,93	0,98	1

Tabella 5.14. Coefficiente di assorbimento di Acustiart-3D in base alla frequenza

ACUSTIBAF C

Assorbitori di forma cilindrica in fibra minerale prodotti Acùstica Integral. Permette l’eliminazione parziale o totale del rumore ambientale mediante l’assorbimento delle riflessioni provenienti dal soffitto.

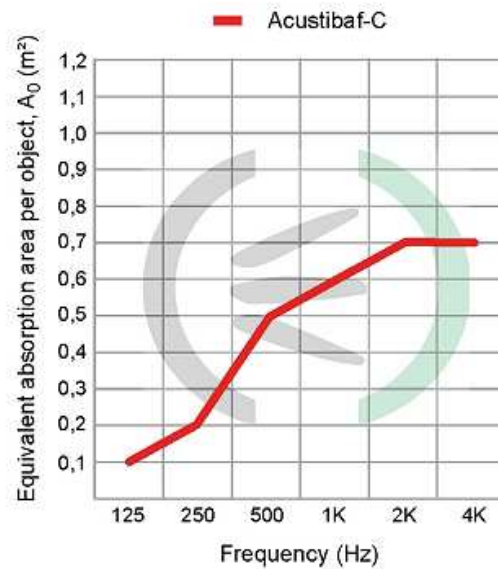



Figura 5.21. Foto e funzione di assorbimento Acustibaf-C

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,1	0,2	0,5	0,6	0,7	0,7

Tabella 5.15. Coefficiente di assorbimento di Acustibaf-C in funzione della frequenza

ACUSTIDECO

Pannelli in fibra di poliestere prodotti da Acùstica Integral.

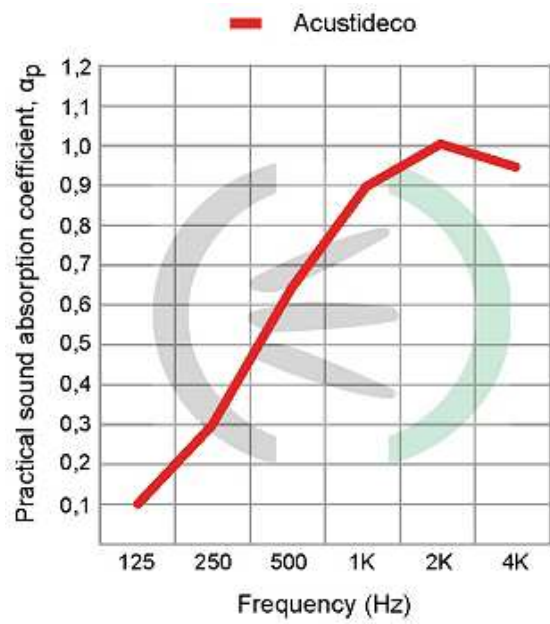



Figura 5.22. Foto e funzione di assorbimento Acustideco

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,1	0,3	0,6	0,9	1	0,95

Tabella 5.16. Coefficiente di assorbimento di Acustideco in funzione della frequenza

ACUSTIFIBER F25

Materiale assorbente in fibra di poliestere prodotto da Acùstica Integral.

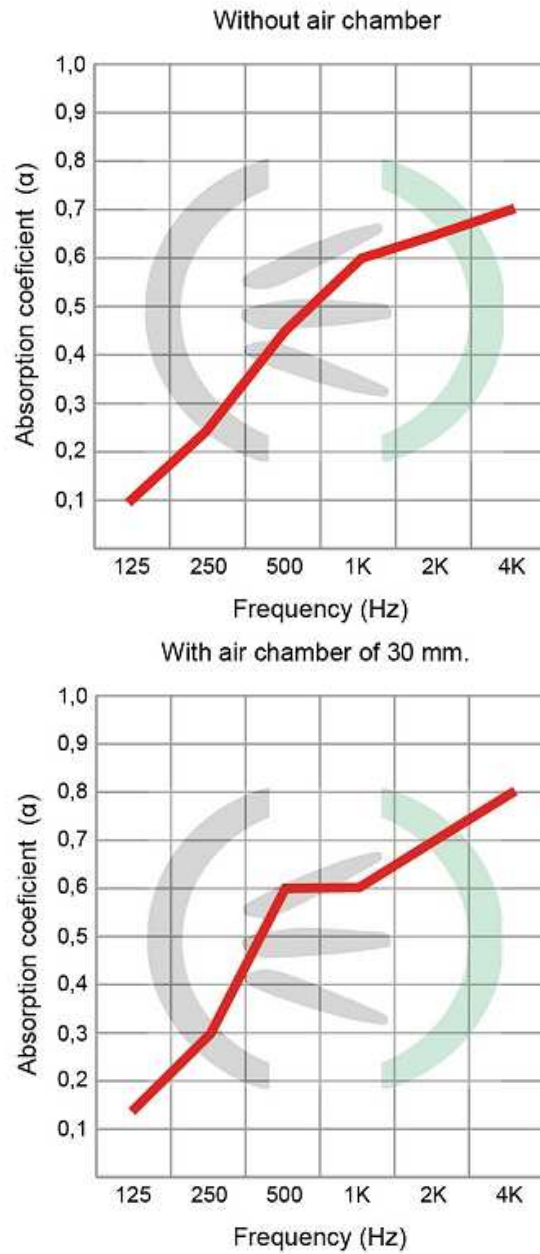



Figura 5.23. Foto e funzione di assorbimento Acustifiber-F25 senza e con intercapedine d'aria

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,1	0,25	0,45	0,6	0,65	0,7
α(30mm air Chamber)	0,15	0,3	0,6	0,6	0,7	0,8

Tabella 5.17.Coefficiente di assorbimento di Acustifiber-F25 in funzione della frequenza

ACUSTIFIBER F25G

Materiale assorbente in fibra di poliestere prodotto da Acùstica Integral. Il comportamento è identico a quello di Acustifiber F25.

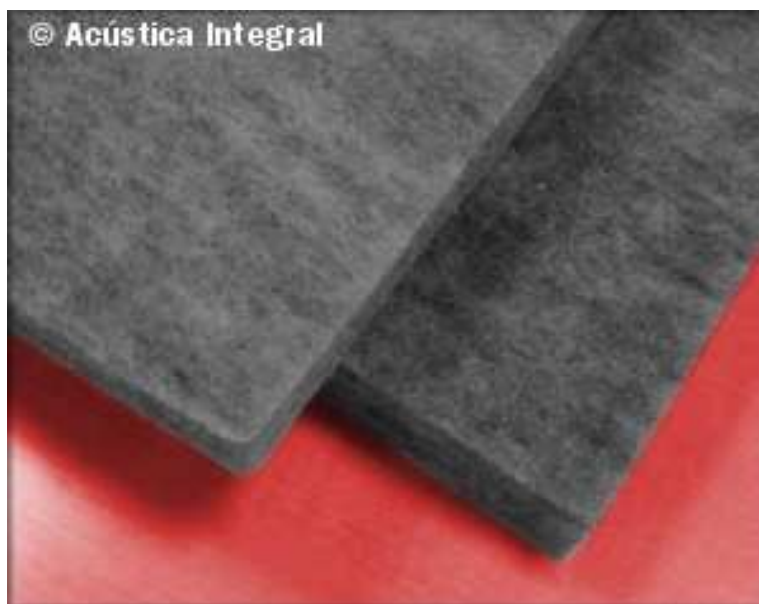



Figura 5.24. Foto Acustifiber-F25G

ACUSTIFIBER F40

Materiale assorbente in fibra di poliestere prodotto da Acùstica Integral. Ottimo per trattamenti di fono assorbimento in sale macchina e rivestimento di involucri.

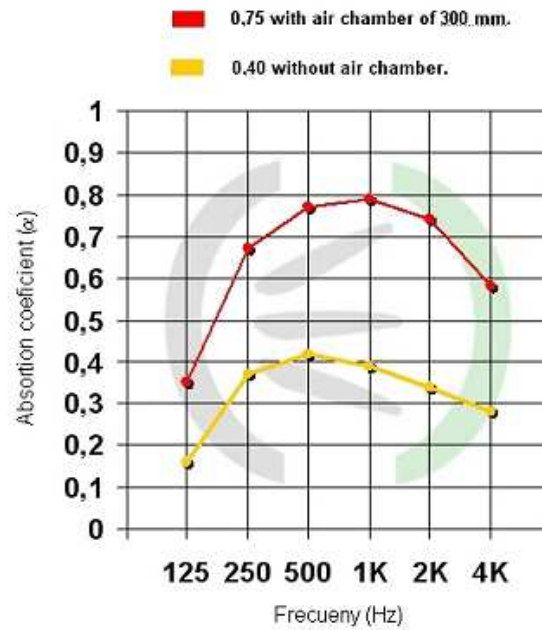



Figura 5.25. Foto e funzione di assorbimento Acustifiber-F40

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,15	0,38	0,42	0,39	0,34	0,28
α	0,35	0,68	0,78	0,79	0,75	0,58

Tabella 5.18.Coefficiente di assorbimento di Acustifiber-F40 in funzione della frequenza

ACUSTIWALL

Pannelli in Poliuretano espanso resistente ai graffi che può essere utilizzato facilmente per rivestimento di pareti. Prodotto da Acùstica Integral.

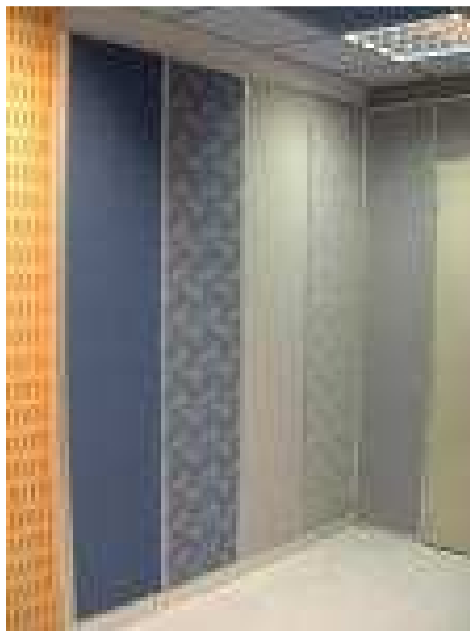
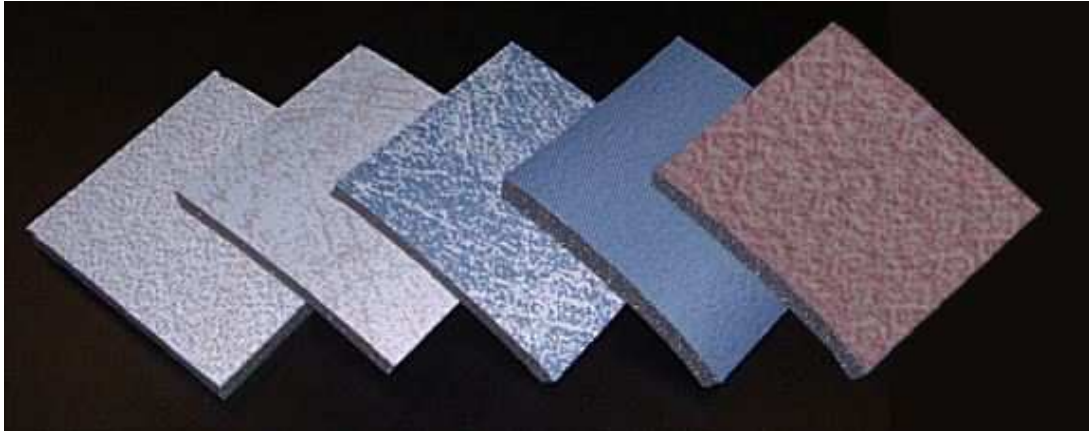
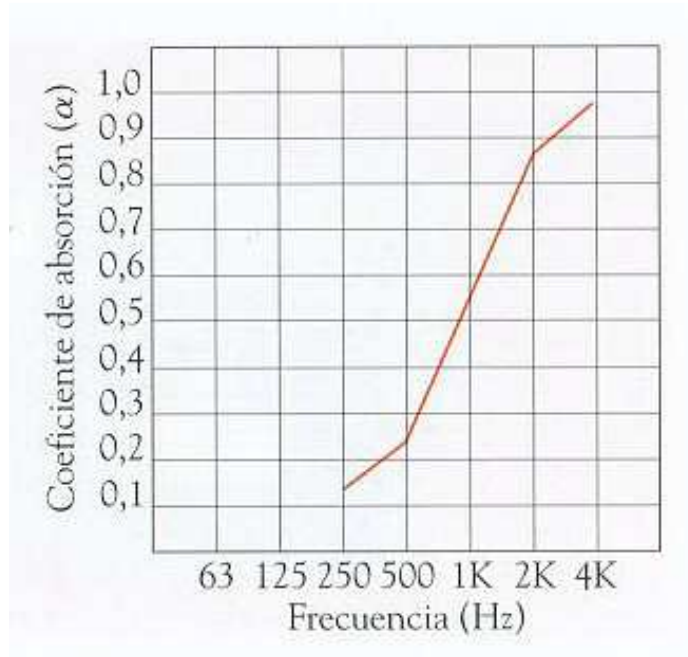



Figura 5.26. Foto e funzione di assorbimento Acustiwall

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0	0,15	0,25	0,55	0,85	0,98

Tabella 5.19.Coefficiente di assorbimento di Acustiwall in funzione della frequenza

BRISA

Pannello in fibra di poliestere formata e pressata prodotta da Acùstica Integral. Viene solitamente utilizzato al posto dei classici soffitti.

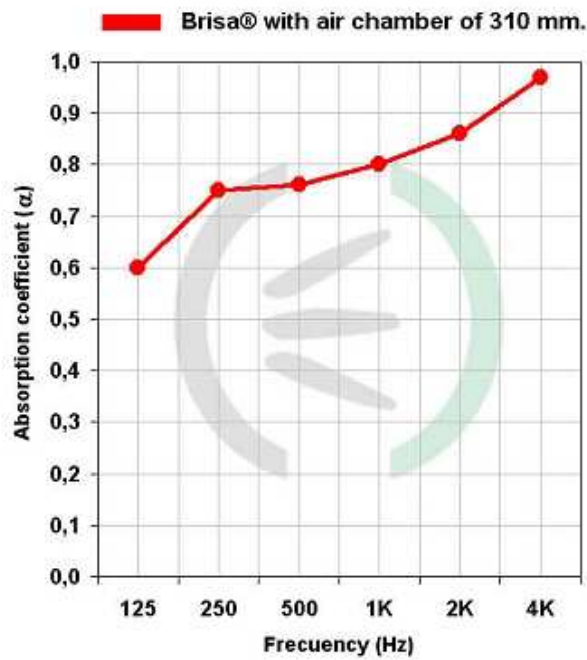



Figura 5.27. Foto e funzione di assorbimento Brisa

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,6	0,75	0,76	0,8	0,87	0,88

Tabella 5.20. Coefficienti di assorbimento di Brisa in funzione della frequenza

ACUSTICAB

Schiuma di poliuretano espanso attaccato ad un film di poliuretano, il che da un'ottima finitura superficiale. Prodotto da Acùstica Integral.

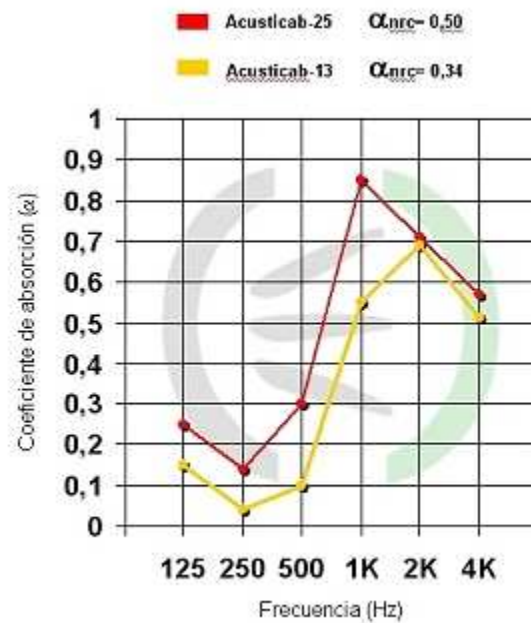



Figura 5.28. Foto e funzione di assorbimento Acusticab

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,15	0,5	0,1	0,55	0,7	0,5
α	0,25	0,15	0,3	0,85	0,7	0,58

Tabella 5.21. Coefficienti di assorbimento di Acusticab in funzione della frequenza

ACUSTICELL

Materiale assorbente flessibile composto da poliuretano espanso e trattato superficialmente così da avere una migliore prestazione assorbente. Prodotto da Acùstica Integral.

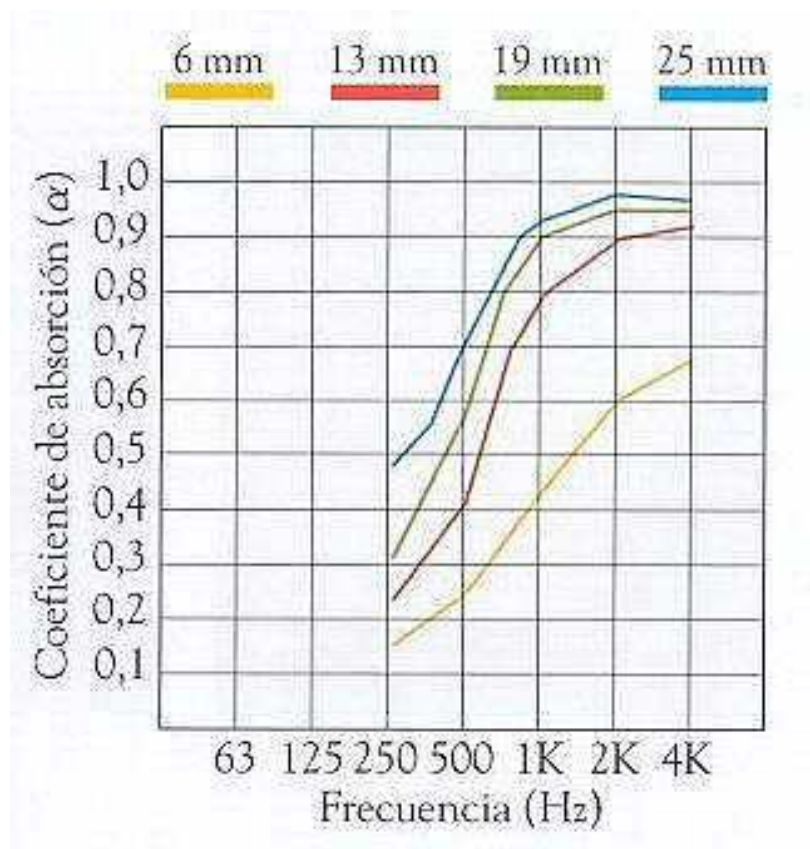



Figura 5.29. Foto e funzione di assorbimento Acusticell

ACUSTISON- 50A

Pannello acustico assorbente polivalente, utilizzabile sia per le pareti che per i soffitti e prodotto da Acùstica Integral. E' costituito all'esterno da un foglio multi perforato e laccato, riempito di lana di roccia rivestita di una pellicola nera.

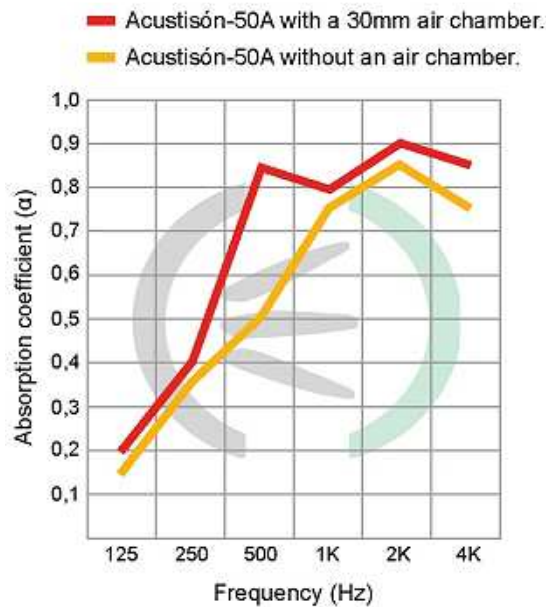



Figura 5.30. Foto e funzione di assorbimento Acustison-50A

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,15	0,35	0,5	0,75	0,85	0,75
α	0,2	0,4	0,85	0,8	0,9	0,85

Tabella 5.22. Coefficiente di assorbimento Acustison-50A in funzione della frequenza

ACUSTIKELL

Pannelli di materiale fibroso applicabili sia a soffitti che a muri. Per incrementare la loro capacità di assorbimento si suole inserire materiale assorbente o aria tra il pannello e la parete. Prodotto da Acùstica Integral.

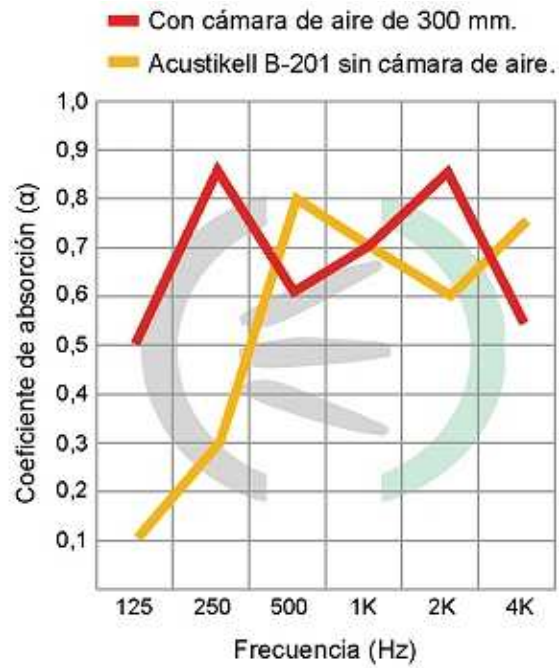



Figura 5.31. Foto e funzione di assorbimento Acustikell

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,1	0,3	0,8	0,7	0,6	0,55
α	0,5	0,85	0,6	0,7	0,85	0,55

Tabella 5.23. Coefficiente di assorbimento di Acustikell in funzione della frequenza

ACUSTIKELL-V

Pannelli in fibra di vetro che, grazie alla loro forma, raggiungono un alto grado di assorbimento acustico. Prodotto da Acùstica Integral, può essere installato sia su parete che su soffitto.

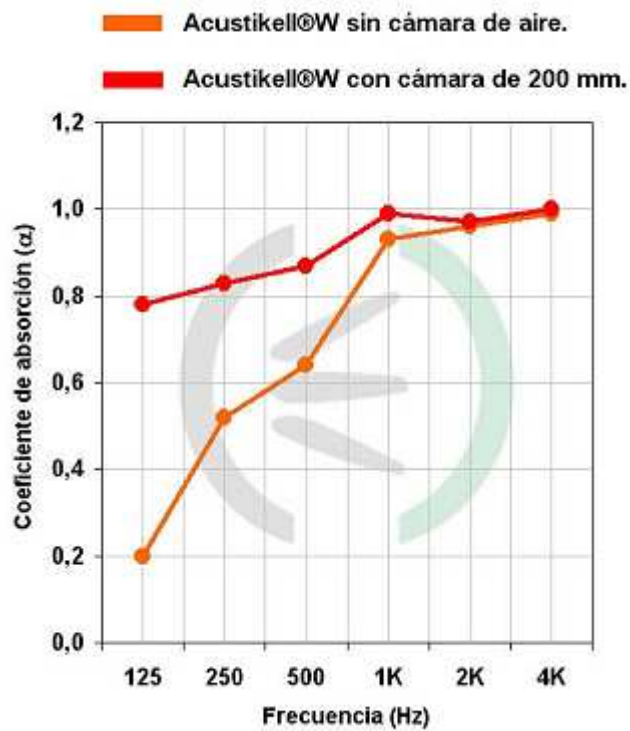



Figura 5.32. Foto e funzione di assorbimento Acustikell-V

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,2	0,5	0,65	0,95	0,98	1
α	0,78	0,85	0,88	1	0,98	1

Tabella 5.24. Coefficiente di assorbimento di Acustikell-V in funzione della frequenza

Risuonatori acustici

Sono formati da una cavità messa in comunicazione con l'ambiente tramite un foro di dimensioni trascurabili rispetto la stessa. Il funzionamento si basa sul principio di Helmholtz (figura 5.17), secondo il quale l'area contenuta nel collo del risuonatore tende a mettersi in vibrazione se la lunghezza d'onda del suono incidente è molto più grande della dimensione della cavità. Quando la frequenza del suono incidente coincide con la frequenza di risonanza della cavità, la velocità di oscillazione dell'aria nel collo assume valori molto alti, comportando l'aumento notevole dell'assorbimento.

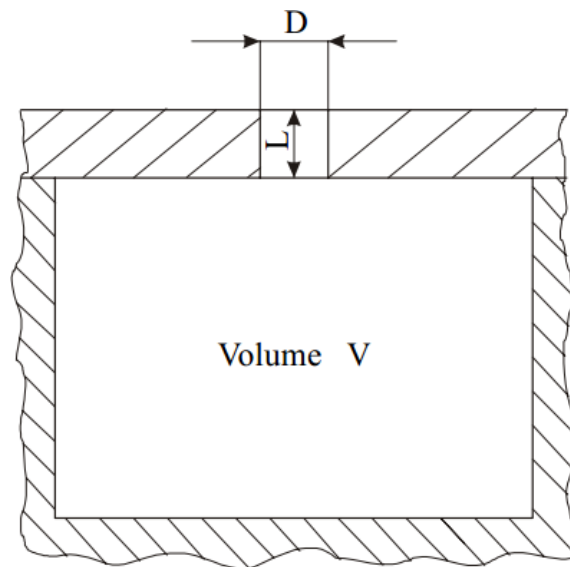



Figura 5.33. Risuonatore di Helmhotz

La frequenza di risonanza del risuonatore acustico espressa in Hz vale:

$$f_r = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{V(L+0.8D)}}$$

Dove c è la velocità del suono (343 m/s), S è la sezione del collo, V è il volume della cavità, L è la profondità del collo, D è il diametro del foro. Nella pratica si usa la più semplice equazione:

$$f_r = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{P_{for}}{ds_{muro}}}$$

Dove P_{for} è la percentuale di foratura(ossia il rapporto fra area forata ed area del pannello), d è la distanza dalla parete e s_{muro} è lo spessore del muro.

L’assorbimento tramite pannello risuonatore è molto selettivo, ed è particolarmente efficace nel caso di toni puri di bassa frequenza compresi fra 50-400 Hz. Rivestendo l’interno della cavità di materiale poroso, si diminuisce il potere assorbente a favore di una maggiore larghezza di banda.

Questi pannelli possono essere metallici, di gesso, di legno oppure di materiali plastici; talvolta si utilizzano delle fenditure al posto dei fori.

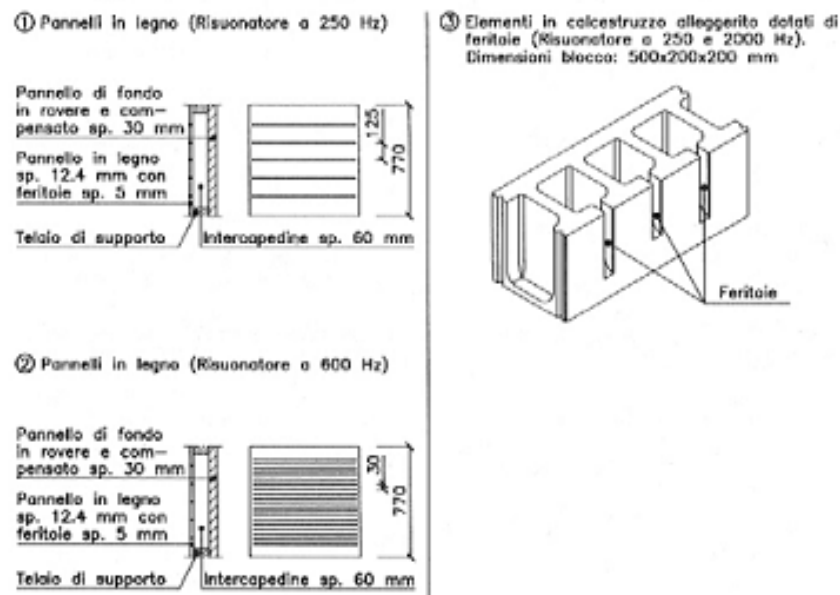



Figura 5.34. Esempi di risuonatori acustici usati in edilizia

Esempi di Risuonatori Acustici

TR-R9

Installabile in qualunque spazio, permette di eliminare le frequenze non desiderate e di avere un effetto di riverbero più controllato, così da avere un suono più reale e piacevole. Internamente è riempito di materiale poroso fonoassorbente. Prodotto da Acùstica Integral.

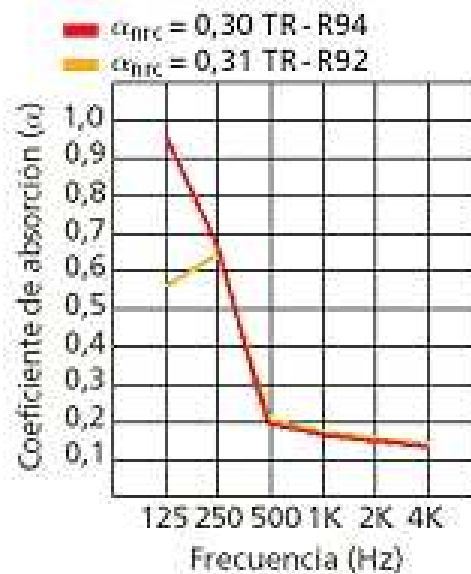



Figura 5.35. Foto e funzione di assorbimento di TR-R9

Il modello TR-R94 ha una frequenza di risonanza intorno ai 140Hz, il TR-R92 intorno ai 250Hz; in corrispondenza di queste due frequenze, si rileva infatti un più alto valore di coefficiente di assorbimento.

DiffondimiHel

Unisce in un unico dispositivo sia la funzione di assorbitore per le basse frequenze, sia quella di diffusore.
Si posiziona sul pavimento, ha un angolo di diffusione di 100° ed una gamma di frequenze diffuse da 300 a 20 kHz. E' progettato in due versioni (figura 5.20), ognuna con diverse caratteristiche di assorbimento ma stesse proprietà diffusive. Prodotto da Labirinti Acustici.

Figura 5.36. Due tipologie di DffondimiHel

Nel primo caso è possibile assorbire una gamma di frequenze regolabile in modo continuo da 31 a 54 Hz per un unico valore; nel secondo da 68 a 112 Hz separatamente per ciascuno delle quattro fenditure.

E' possibile combinare più DiffondimiHell in modo da assorbire più frequenze e migliorare il campo diffuso.

Figura 5.37. Esempio di utilizzo di DiffondimiHel

E' stato analizzato il comportamento di DiffondimiHell:

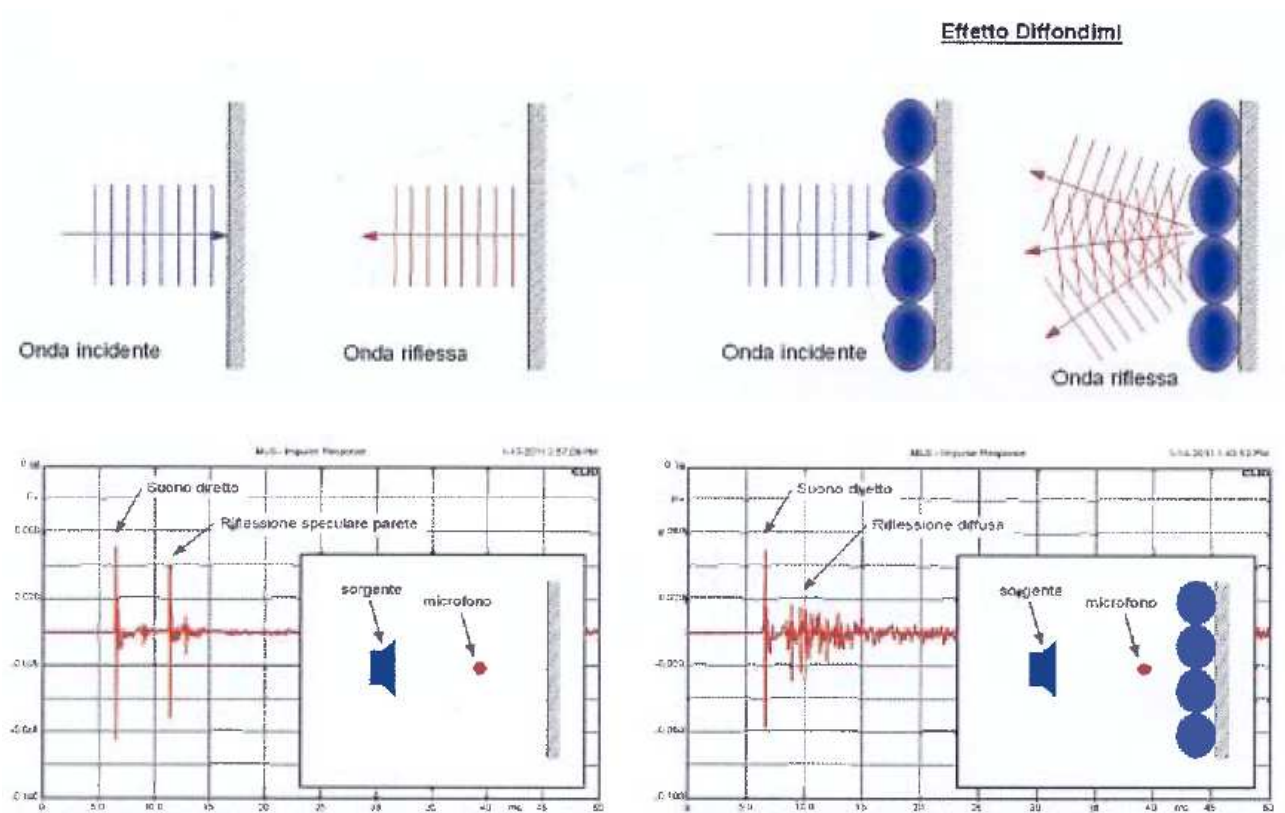



Figura 5.38. Funzionamento DiffondimiHel

Come si nota dal grafico (figura 5.22), con l’utilizzo di questa tecnologia è possibile eliminare l’onda riflessa indesiderata a favore di un campo diffuso, il che migliora in confort acustico dell’ambiente. Questo fenomeno avviene anche grazie al fatto che il tempo di riverbero viene reso costante e diminuito, ed inoltre le risonanze ricadono velocemente nel tempo (figura 5.23).

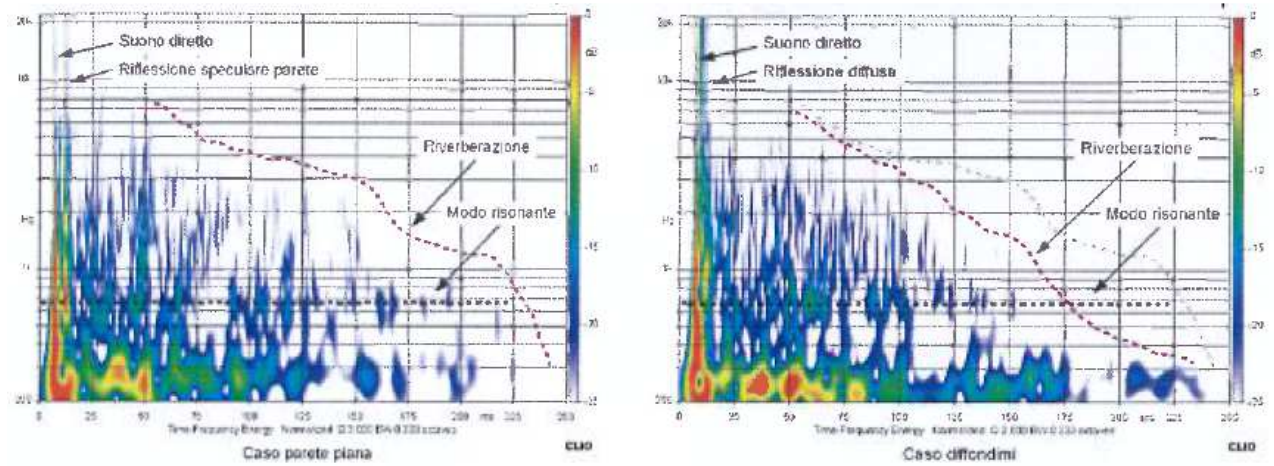



Figura 5.39. Miglioramento del tempo di riverbero grazie all'utilizzo di DiffondimiHel

Pannelli Vibranti

Basati sul principio che un pannello posizionato ad una certa distanza dalla parete inizierà a vibrare se colpito da un’onda sonora;i vari modi di vibrazione dipenderanno dal tipo di vincolo e delle caratteristiche elastiche della piastra.
Se lo spessore dell’intercapedine è piccolo in relazione alle dimensioni del pannello e i vincoli di fissaggio sono sufficientemente cedevoli, si può approssimare questa situazione come un sistema massa-molla, dove l’aria contenuta nell’intercapedine viene simulata da una molla e la parete da una massa.
In questo modo è possibile calcolare la frequenza di risonanza come:

$$f_r = \frac{60}{\sqrt{M_s d}}$$

Dove M_s è la massa superficiale del pannello (espressa in kg/m^2), d è lo spessore dell’intercapedine.

L’assorbimento mediante questo tipo di pannelli è molto selettivo; per questo motivo vengono spesso abbinati con materiali porosi per aumentare la banda d’azione (figura 5.24).

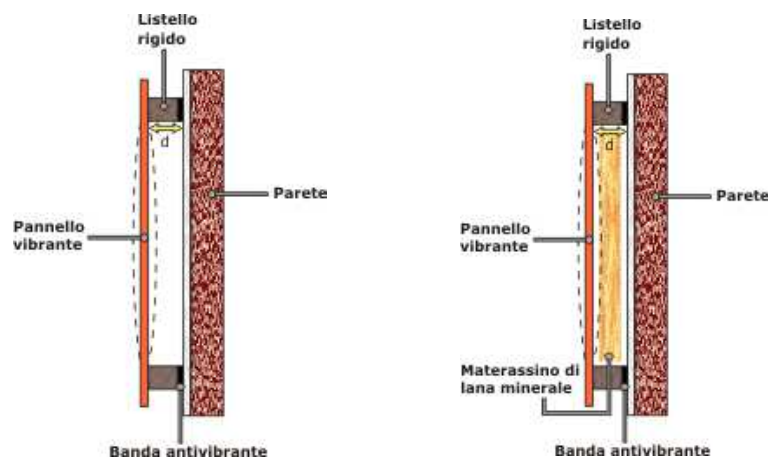



Figura 5.40. Esempio di utilizzo di un pannello vibrante senza e con materiale abbinato

I pannelli sono normalmente di forma regolare, quadrati o rettangolari, con spessori dell’ordine di qualche millimetro e lati con misure del mezzo metro; sono tipicamente in legno compensato e strutture di fibra di legno, ed operano bene nel campo di frequenze comprese fra 50 e 300 Hz.

Esempi di Pannello Vibrante

Bass-Absorber

E' un pannello, prodotto in differenti misure da Kaefer, composto da due strati di lana minerale fonoassorbente, in mezzo ai quali è presente una membrana vibrante capace di assorbire frequenze al di sotto dei 250 Hz (figura 5.25).

Figura 5.41. Esempi di Bass-Absorber senza e con decorazioni

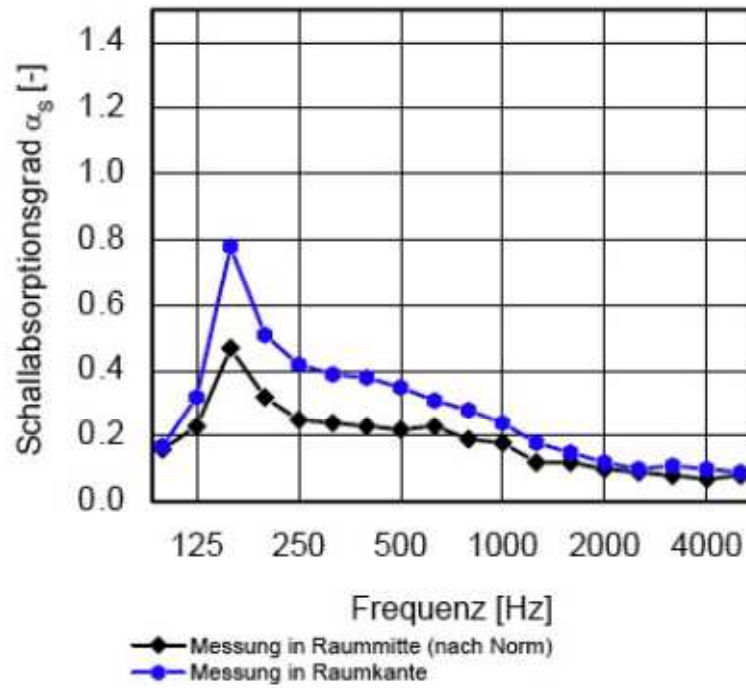



Figura 5.42. Funzione di assorbimento Bass-Absorber

Il grafico in nero rappresenta all’andamento dell’assorbimento, al crescere della frequenza, relativo ad un singolo pannello; il grafico in blu è invece relativo a due pannelli posizionati così da formare un angolo retto.

Controsoffitti fonoassorbenti

Uno dei sistemi di fono assorbimento maggiormente utilizzato è il controsoffitto fonoassorbente; il successo di questa soluzione è dovuta al fatto che si opera su una sola superficie, sufficientemente ampia e poco esposta ad usura.

Per la sua costruzione vengono solitamente impiegati pannelli in alluminio, PVC, gesso, o lana di vetro, con superficie a vista trattata o in fibre minerali; ottimo per trattamenti acustici di uffici, sale e locali pubblici.

Tali pannelli sono collegati tramite apposite strutture sospese al soffitto così da evitare un’eventuale trasmissione del rumore per via strutturale (figura 5.26).

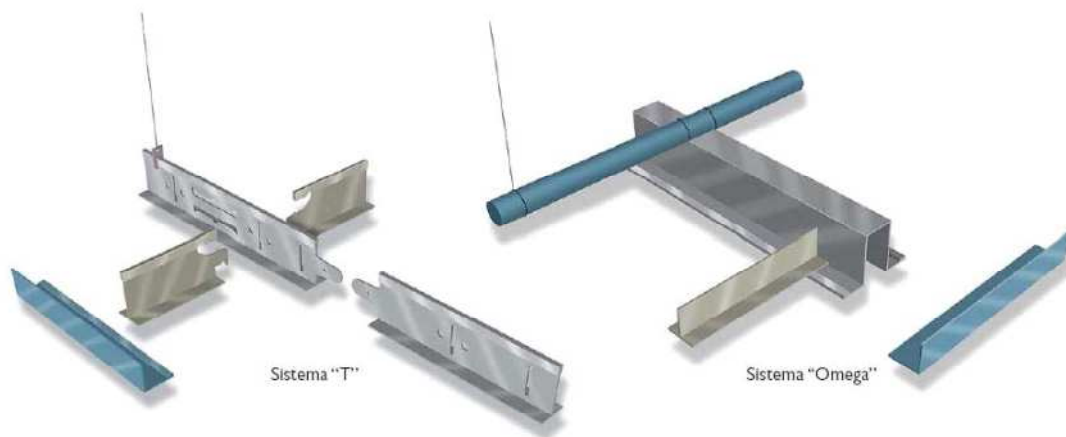



Figura 5.43. Due tipiche configurazione di montaggio di un pannello da controsoffitto

Il controsoffitto può avere un comportamento acustico combinato: può limitare infatti l’energia acustica all’interno di una stanza con pannelli costituiti da materiale poroso, con l’utilizzo di risuonatori acustici o pannelli vibranti.

Figura 5.44. Foto di possibili controsoffitti

Un aspetto importantissimo in fase di progettazione è la distanza tra controsoffitto ed intradosso del solaio: aumentandola, la frequenza di risonanza del sistema pannello intercapedine si sposta verso il basso, causando un incremento dell'assorbimento delle basse frequenze.

Microsorber®

Si tratta di un’innovativa tecnologia introdotta da Kaefer che sfrutta dei fogli o pannelli microforellati che sono in grado di spezzare il fronte d’onda e, attraverso un reazione fisica, diminuire sensibilmente il tempo di riverbero e il livello di pressione sonora.

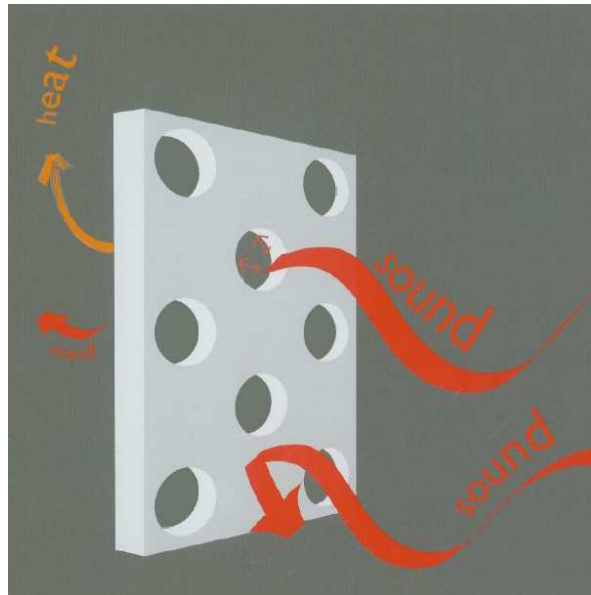



Figura 5.45. Funzionamento del Microsorber

Quando l’onda colpisce il microsorber, il fronte d’onda viene frammentato grazie ai microfori, e tramite la frizione causata dagli stessi, una parte di energia sonora viene trasformata in calore che si dissipa (figura 5.29).

Il microsorber può essere costituito da fogli di diversi materiali (poliacrilato, PVC o etilene tetrafluoroetilene) , o da un pannello di policarbonato; ciascuno di essi è ignifugo e progettato per avere un’alta resistenza alla corrosione per un ampio spettro di temperature (figura 5.30).

Figura 5.46. Differenti tipologie di Microsorber a seconda dei materiali

I fogli di microsorber hanno uno spessore di 0.105 mm ed un peso di 0.14kg/m^2; le micro perforazioni hanno un diametro di 0.21 mm e sono distanziate ciascuna da 2 mm. A seconda della distanza a cui lo poniamo dalla superficie sulla quale si va ad operare avremo diverse risposte in frequenza (figura 5.31):

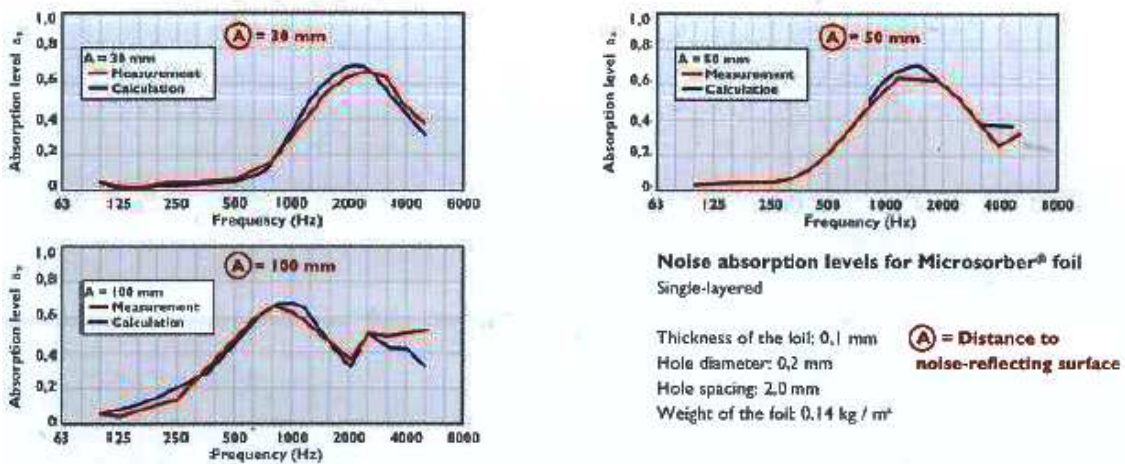



Figura 5.47. Prestazione del singolo strato di Microsorber a seconda della distanza a cui viene installato dal muro

Si possono anche usare due fogli combinati assieme, distanziati fra loro di 3 cm (figura 5.32):

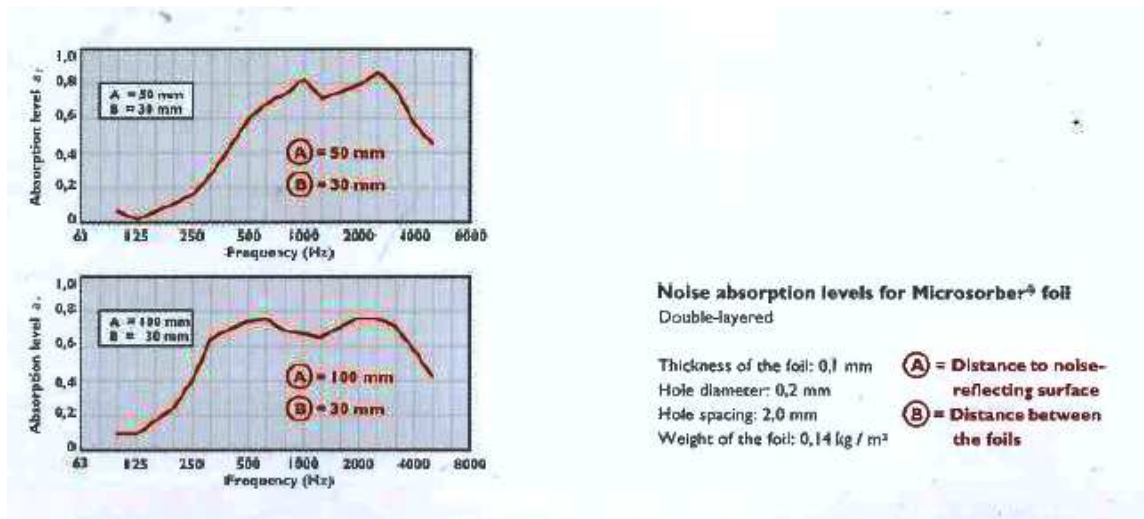



Figura 5.48. Prestazione del doppio strato di Microsorber a seconda della distanza a cui viene installato dal muro

Il pannello di policarbonato di microsorber ha uno spessore che varia fra i 3 e i 5 mm, microfori di diametro 0.8 mm e distanza fra di essi di 5.33 mm.

Grazie alla loro estetica che non altera il design degli ambienti nel quale è utilizzato, il microsorber è da preferire ai materiali d’assorbimento tradizionali.

Di seguito è possibile osservare due esempi di utilizzo di questo materiale: in un ampio cortile interno di un palazzo (figura 5.33), ed in una piscina (figura 5.34):

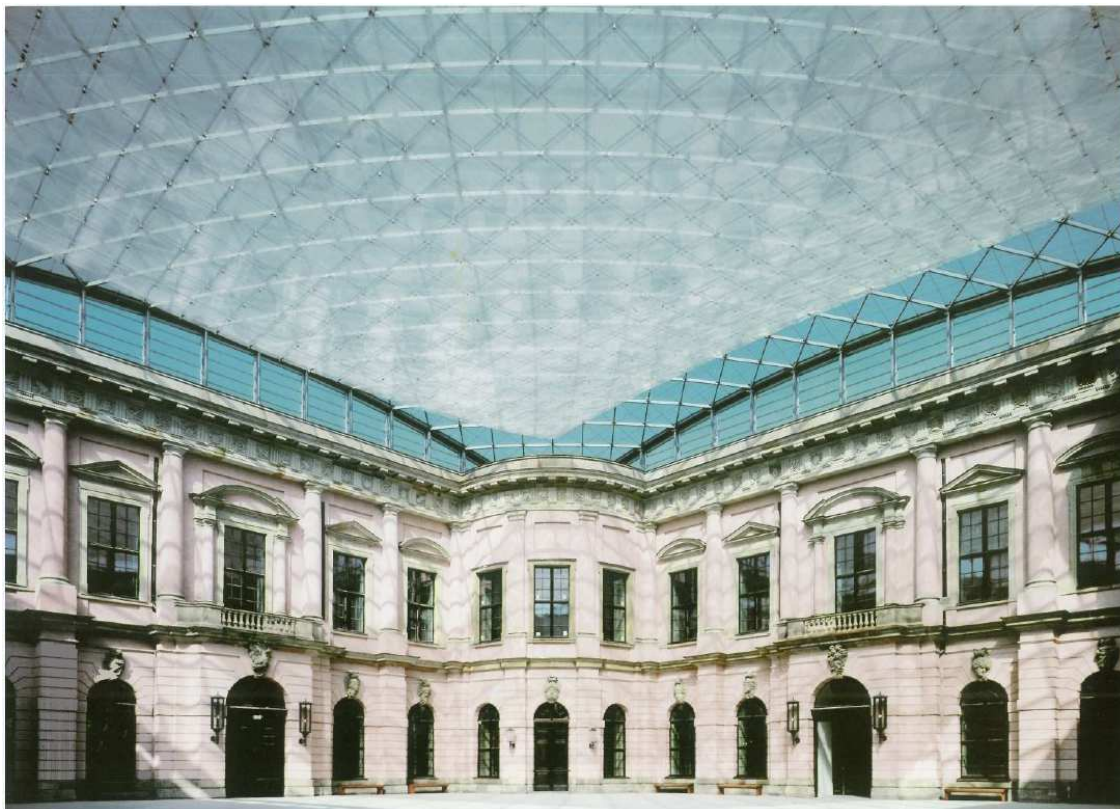



Figura 5.49. Utilizzo del Microsorber in un ampio cortile

Figura 5.50. Utilizzo del Microsorber in una piscina

Sistemi Fonoisolanti

Sebbene irrilevanti ai fini della tesi, per completezza è bene citare alcune problematiche relative al problema dell’isolamento acustico.

Quando una sorgente sonora è attiva, trasmette il rumore agli ambienti circostanti per via aerea o per via strutturale; nel primo caso le onde sonore incideranno sulle pareti mettendole in vibrazione e trasmettendo il rumore all’esterno, nel secondo caso la vibrazione acustica si propagherà direttamente dalla sorgente alla struttura dell’edificio, arrivando con livelli sonori alti anche ad ambienti non adiacenti a quello contenente la sorgente.

Precedentemente è stato mostrato che la trasmissione acustica viene espressa tramite il coefficiente di trasmissione acustico $t = \frac{E_{trasmessa}}{E_{incidente}}$; solitamente in acustica si preferisce utilizzare il potere fonoisolante R, definito come:

$$R = 10Log\frac{1}{t}$$

Nel caso ideale in cui il campo sonoro nei due ambienti sia perfettamente diffuso e si trascurino i fenomeni di trasmissione indiretta (tutto il rumore si trasmette attraverso la parete), possiamo ridefinire il potere fono isolante come:

$$R = D + 10Log\frac{S}{A_2}$$

Dove $D = L_{p1} - L_{p2}$ è l’isolamento acustico, cioè la differenza fra il livello sonoro nel primo e nel secondo ambiente, S è la superficie del divisorio e A_2 è il numero di unità assorbenti nel secondo ambiente (definito come $\bar{\alpha}S_2$, con S_2 area dell’ambiente ricevente).

Alternativamente nel mondo dell’acustica, si utilizza il coefficiente di isolamento acustico normalizzato D_n

$$D_n = D + 10Log\frac{A_0}{A_2}$$

(con A_0 superficie di riferimento pari a $10m^2$, e A_2 numero di unità assorbenti dell’ambiente ricevente), o il coefficiente di isolamento standardizzato D_{nt}

$$D_{nt} = D + 10Log\frac{T_{60}}{T_0}$$

(T_{60} è il tempo di riverberazione dell’ambiente ricevente, T_0 tempo di riverberazione di riferimento pari a 0.5s).

Ognuno di questi indici vale per una ben determinata frequenza.

Potere Fonoisolante

Solitamente una parete viene colpita da un'onda in maniera casuale; data la premessa, a seguito di esperimenti e misurazione in laboratorio, è stato possibile ricavare la definizione generale di potere fonoisolante:

$$R = 18Log(M_s f) - 44$$

Dove M_s è la massa superficiale espressa in kg/m^2, ed f è la frequenza. Come si può notare dalla formula, a seguito anche di ulteriori misurazioni in laboratorio, ad ogni raddoppio di massa superficiale o frequenza, il potere fonoisolante aumenta di un valore compreso fra i 5 e i 6 dB.

Partendo da questo, si è ricavato il grafico dell'andamento del potere fonoisolante in funzione della frequenza (figura 5.35):

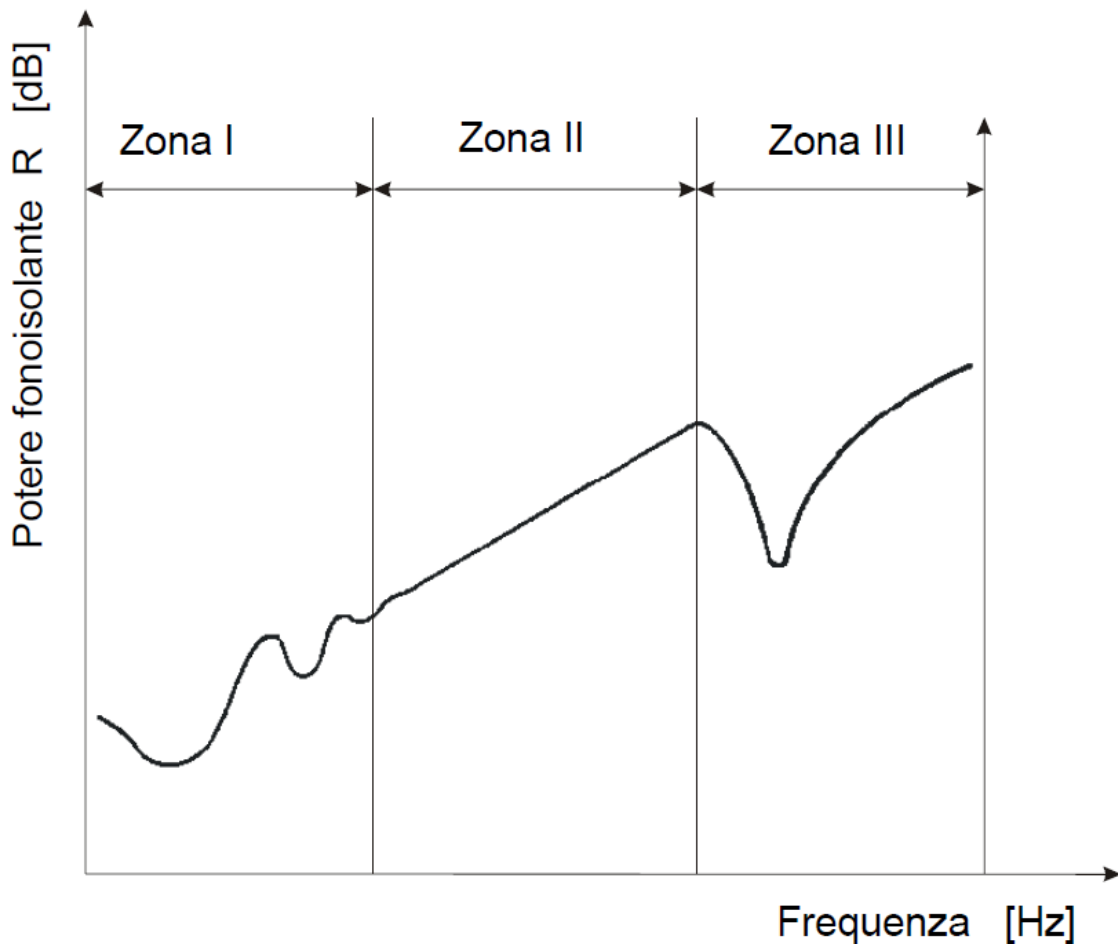



Figura 5.51. Grafico del potere fonoisolante di un materiale in funzione della frequenza

Il grafico è diviso in tre zone:

- *Zona 1:* zona caratterizzata dalle basse frequenze. La parete entra in risonanza aumentando così la sua oscillazione e quindi la sua trasmissione sonora. Dal momento che, solitamente, la frequenza di risonanza si aggira intorno a poche decine di Hertz (soglia dell’udibile), il peggioramento del potere fonoisolante non è particolarmente significativo.

- *Zona 2:* l’andamento del potere fonoisolante segue la legge di massa (per cui più un materiale è pesante più isola).

- *Zona 3:* zona in cui avviene il fenomeno della coincidenza. Se un suono colpisce la parete con una frequenza pari a quella dell’onda flessionale, allora la stessa, vibrando, trasmette nell’altro ambiente un’onda sonora di pari ampiezza. In questa situazione il potere fonoisolante diminuisce di valore compreso fra i 15 e i 20 dB, per poi aumentare all’aumentare della frequenza, ad un livello però sempre inferiore rispetto a quello teorico descritto dalla legge di massa di 5-10 dB.
  Dal momento che in un campo diffuso le onde arrivano con incidenza casuale, ce ne sarà sempre una con frequenza pari a quella di coincidenza, e cioè:

$$f_c = \frac{c^2}{\pi d}\sqrt{\frac{3\rho(1-\sigma^2)}{E}}$$

  dove c è la velocità del suono, d è lo spessore della parete, ρ la massa volumica del materiale, σ il modulo di Poisson del materiale, E modulo di Young del materiale.

Oltre a queste considerazioni, in fase di progettazione bisogna tener conto che gli elementi di una parete (porte, finestre, etc.) o piccole fessure in essa, a causa dei possibili fenomeni diffrattivi, possono condizionare negativamente il potere fonoisolante.

Un altro caso è quello delle pareti doppie. Solitamente, per frequenze inferiori a quella di risonanza, non si ottiene nessun vantaggio nell’utilizzo di una parete doppia piuttosto che un’unica parete di massa uguale alla somma delle due. Poiché nella realtà non è sempre possibile avere una singola parte abbastanza spessa da isolare due ambienti, si suole usare due pareti con intercapedine riempita di materiale fonoassorbente; in questo caso la struttura s’irrigidisce aumentando la frequenza di risonanza, ma migliora altresì il suo comportamento in tali condizioni, aumentando lo smorzamento del sistema.

Il controllo attivo del rumore (ANC –Active Noise Controll)

L’impraticabilità di adottare sistemi passivi di fonoassorbimento per le basse frequenze, ha portato allo sviluppo di un nuovo metodo di trattamento del rumore, detto controllo attivo del rumore.

Il controllo attivo del rumore consiste in un dispositivo capace di generare un rumore uguale ma di fase opposta al rumore originale, operando in tal modo un’interferenza distruttiva in grado di cancellare il disturbo. Tale metodo è stato soprattutto utilizzato in ambito aereonautico nella creazione di cuffie a controllo attivo per i piloti e nei silenziatori per le cabine di pilotaggio, ed in campo civile negli impianti di condizionamento.

La complessità dei diversi scenari in cui è possibile utilizzare questo tipo di approccio dipende dallo spazio in cui si opera: in caso di attenuazione di rumore puntuale (come nel caso delle cuffie a controllo attivo) o monodimensionale (come nel caso condotti aeraulici), l’utilizzo di un sistema di controllo attivo del rumore è relativamente semplice e poco costoso; il problema di attenuare un rumore in uno spazio tridimensionale risulta invece più arduo da risolvere sia per problemi di ordine fisico che tecnico.

Controllo di tipo diretto

Il precursore ed inventore del controllo attivo del rumore è stato Paul Lueg nel 1934 (figura 5.36).

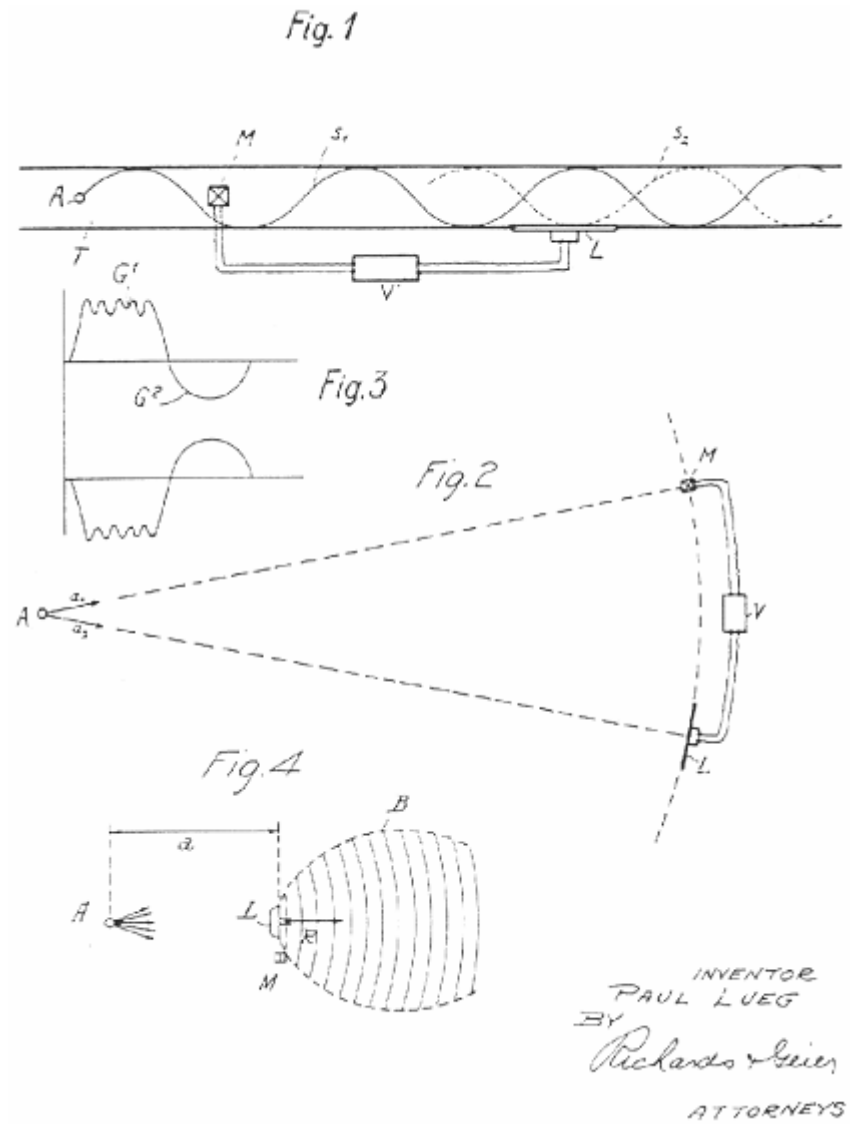



Figura 5.52. Bozza del funzionamento del controllo attivo del rumore di tipo diretto progettato da Lueg

Il principio su cui si basava è lo stesso utilizzato negli odierni sistemi di controllo attivo del rumore: generare un onda uguale ma di fase opposta a quella del segnale disturbante. Lueg non riuscì a realizzare il sistema per mancanza di mezzi tecnologici adeguati alla costruzione dell’elemento “V” del suo schema, che nei moderni sistemi contiene un Processore Digitale di Segnale (DSP).

In pratica il controllo attivo consiste nell’interferenza di due o più onde acustiche al fine di attenuare il più possibile l’onda disturbante; il caso più semplice è quella di un condotto

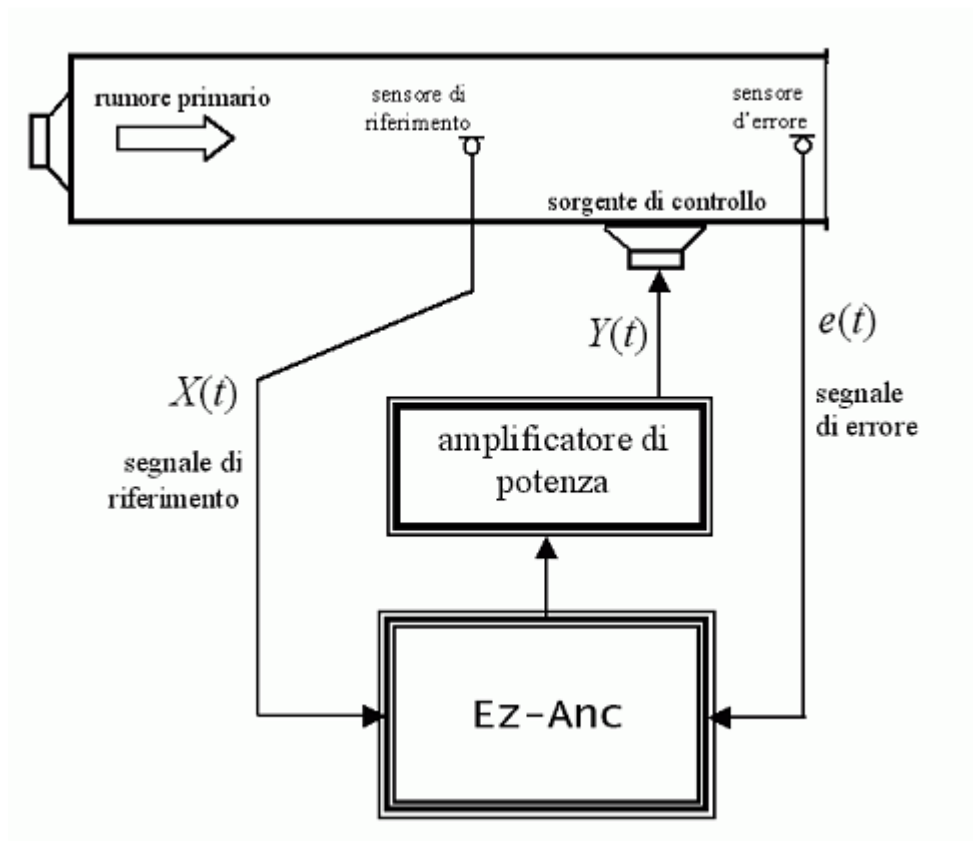



Figura 5.53. Schema a blocchi del funzionamento del controllo attivo del rumore di tipo diretto ideato da Lueg

Come si vede dallo schema (figura 5.37) è presente un microfono di errore in cascata alla sorgente di controllo, usato per valutare l’intervento del controllo attivo.

La distanza fra sensore di riferimento e sorgente di controllo è molto importante: più è grande, minore è la contaminazione con il segnale generato ma maggiore è la complessità del modello del percorso di cancellazione.

Controllo a Retroazione

Il progetto originale, chiamato *"Assorbitore di Suono Elettronico"*, è stato realizzato da Olson a May nel 1953 (figura 5.38).

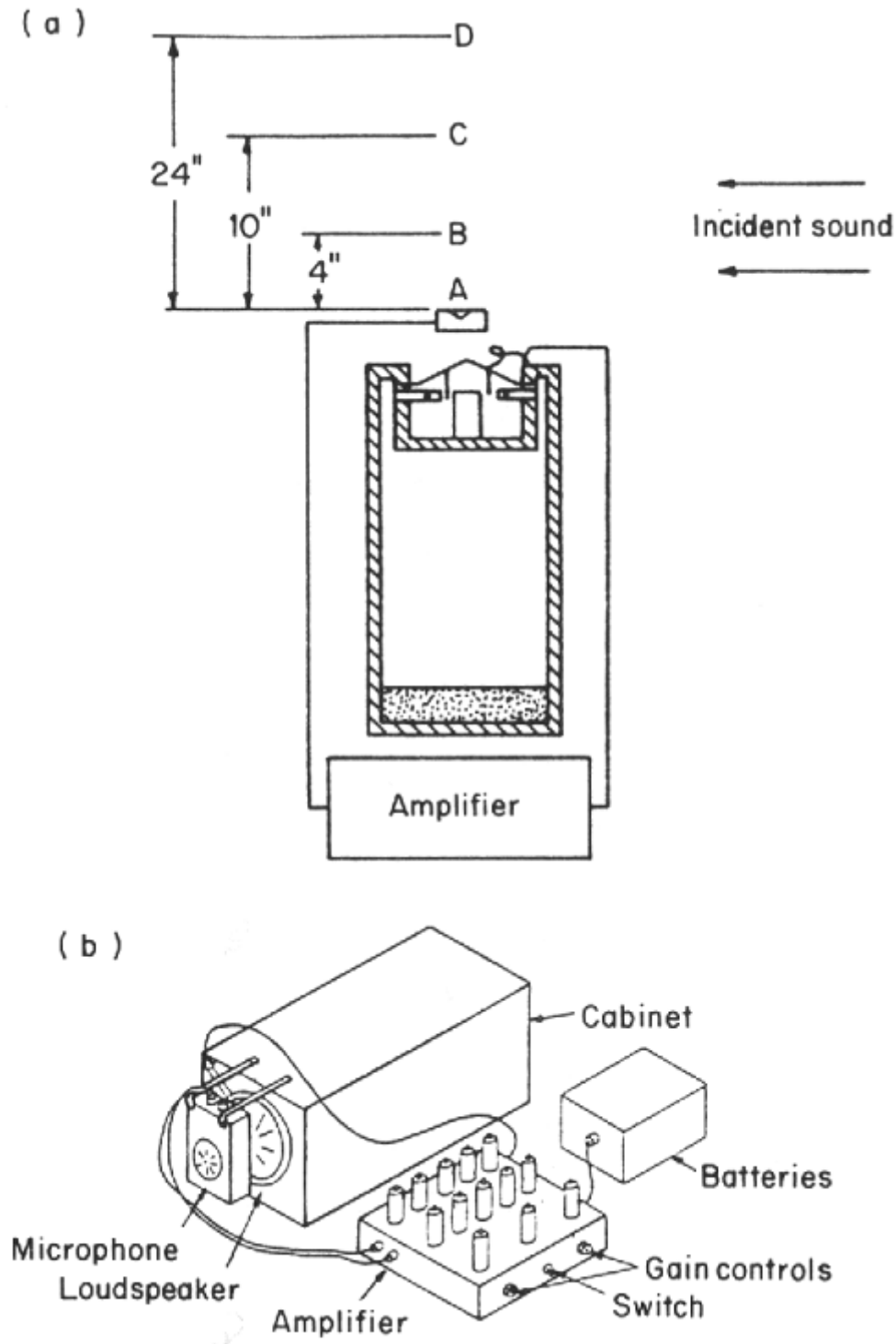



Figura 5.54. Bozza del controllo a retroazione ideato da Olson e May

Nel sistema è presente un microfono con risposta in frequenza piatta fino a 0Hz ed una risposta di fase minore di 2 gradi da 20Hz a 400Hz, per evitare feedback positivo.

Il segnale è amplificato da un amplificatore a valvole la cui uscita alimenta un altoparlante, il che evita di utilizzare un trasformatore che introdurrebbe un notevole sfasamento. Ciò fatto, si attua un'inversione del segnale, in modo tale che esca dall'altoparlante sfasato di 180 gradi rispetto il segnale in ingresso.

Questo apparato offre i migliori risultati come riduttore di suono puntuale.

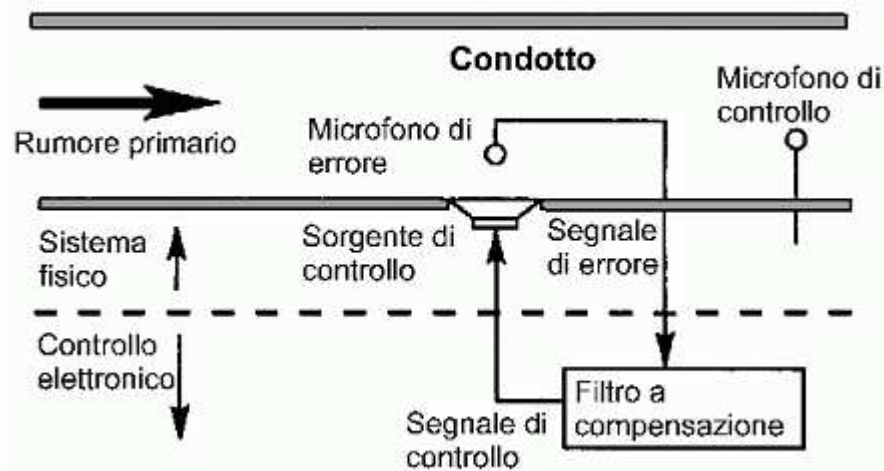



Figura 5.55. Schema a blocchi del controllo a retroazione inventato da Olson e May

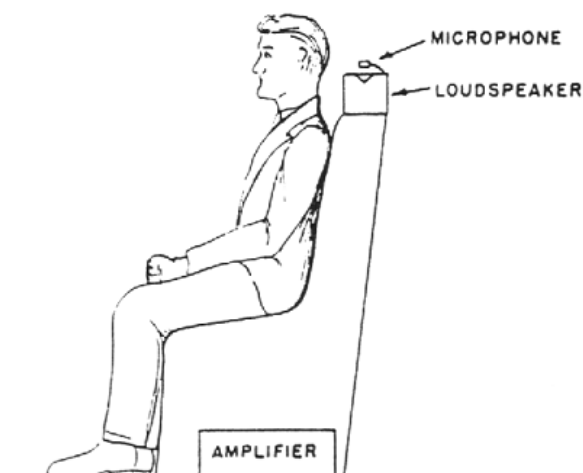



Figura 5.56. Esempio di applicazione di controllo a retroazione (riduzione del rumore all'interno di un aereo)

Un sistema a retroazione agisce solo sull’errore residuo, rilevato mediante un microfono di controllo a valle del punto in cui l’altoparlante agisce (figura 5.39).

Per la sua instabilità questa tecnica non venne all’epoca applicata. Oggigiorno i progressi tecnologici hanno permesso notevoli miglioramenti. Rimane il fatto che, per ragioni fisiche, il controllo a retroazione mantiene un’intrinseca tendenza all’instabilità e perciò richiede un’accurata progettazione e cautela nell’utilizzo.

Analisi della prestazione di un sistema di controllo attivo del rumore

Come detto, la scelta della posizione dei microfoni e degli altoparlanti è di cruciale importanza. In particolare, per la calibrazione, la posizione dei microfoni ed i limiti del funzionamento del controllo attivo, si deve analizzare la funzione di coerenza fra segnale di ingresso ed uscita del sistema.

La *Coerenza* è una funzione scalare che può assumere valori compresi fra 0 e 1, ed esprime la linearità fra due segnali X(f) e Y(f) tali per cui:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

Con H(f) funzione complessa detta “*Funzione di Trasferimento”* del sistema.

Data la funzione reale *Autospettro*, definita come: $G_{xx}(f) = X(f)X^*(f) = |X(f)|^2$.

Data la funzione complessa *Cross-Spettro*, definita come: $G_{yx}(f) = Y(f)X^*(f)$.

Si definisce *Coerenza* la funzione reale:

$$\gamma^2(f) = \frac{\left|G_{yx}(f)\right|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}$$

Nell'ipotesi che il sistema sia lineare e i segnali X(f) e Y(f) siano privi di rumore è possibile verificare che $\gamma^2(f)=1$, mentre altrove $0<\gamma^2(f)<1$. Di conseguenza si ha che la funzione di coerenza indica qualitativamente l'ipotesi di linearità del sistema in esame e di assenza del rumore sui segnali.

Il controllo attivo ha buone possibilità di azione per quelle frequenze in cui la coerenza è prossima a 1, mentre non avrà buone prestazioni alle frequenze in cui questa decade.

Capitolo 6

Rilievi ed Analisi Ambientale

Primo Rilievo: quote del locale

Rilievo Pianta

Il primo passo è stata l'analisi geometrica dell'ambiente: tramite l'utilizzo di metri laser si è calcolato il perimetro dell'ambiente, pari a 70.7m, l'altezza media, pari a 3.57m, l'area della superficie calpestabile, pari a 129.53m^2, e di conseguenza l'area della superficie totale del locale, 512 m^2, ed il volume totale, 463m^3 (vedere Appendice 1 per dettaglio quote).

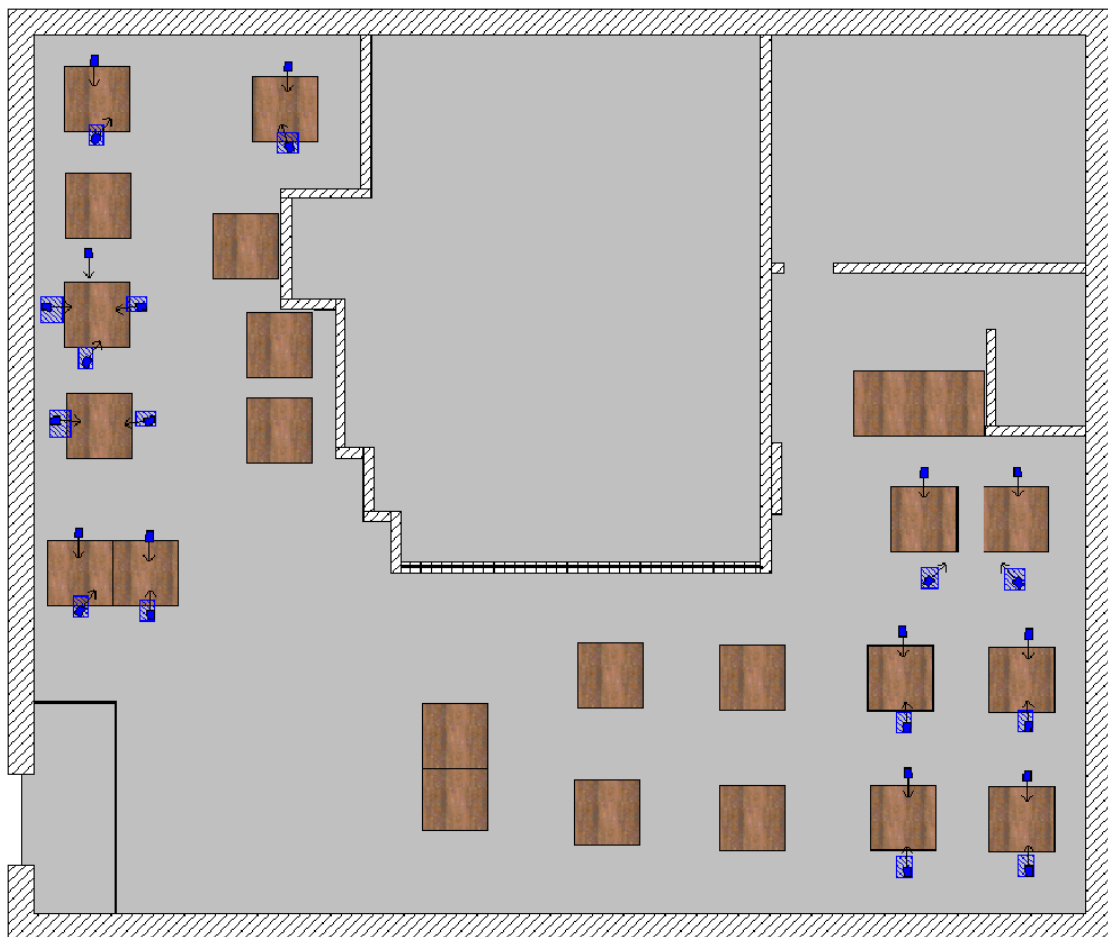



Figura 6.57. Pianta del locale

Il locale può essere suddiviso in tre zone principali: la sala alla sinistra dell'ingresso, la sala centrale in fronte alla cucina e la sala in corrispondenza del bar.

Entrati nel locale, un separè in vetro guida il cliente verso l’ingresso, costituito dalla cantina e la zona cassa; il soffitto è in legno con travi a vista.

Figura 6.58. Ingresso del locale

La sala di sinistra

La sala alla sinistra dell’ingresso può ospitare fino a 32 persone ed è divisa in tre sezioni evidenziate da tre archi.

Figura 6.59. Sala di sinistra

I muri sono per la maggior parte costituiti da mattoni a vista, mentre i controsoffitti in cartongesso sono impreziositi da lampadari, differenti a seconda della sezione. Sono inoltre presenti quattro finestre con doppio vetro.

La sala centrale

La sala centrale si trova di fronte la cucina a vista del ristorante e può ospitare fino a 18 persone.

Figura 6.60. Sala centrale con vista cucina

La sala si trova sotto una cupola in cartongesso ed è delimitata, da una parte dalla grande vetrata che dà sulla cucina, dall'altra da un muro con mattoni a vista decorato con due archi.

Figura 6.61. Sala centrale vista muro con archi in mattoni a vista

La sala Bar

La sala può ospitare fino a 18 persone ed ha un soffitto costituito in parte di legno con travi a vista, in parte da una controsoffitto in cartongesso.

Figura 6.62. Sala Bar

Il grande muro in mattoni a vista è decorato con un enorme specchio, mentre l'altro lato della sala comprende una finestra con doppio vetro ed una porta vetrata (anch'essa con doppi vetri) adibita ad uscita di emergenza.

Secondo Rilevo: Tempo di riverbero e livello di pressione sonora

Con l'aiuto del fonometro, utilizzando una pistola caricata a salve, si è calcolato il tempo di riverbero dell'ambiente; dopo diverse misurazioni, si è giunti al seguente risultato:

Frequenze (Hz)	RT60 - Medio	Alpha_medio - TOT
125	0,5775	0,252107008
160	0,615	0,236734629
200	1,185	0,122862276
250	1,0375	0,140329443
315	1,54375	0,094310476
400	1,1325	0,128557878
500	1,21875	0,119459936
630	1,27375	0,114301705
800	1,26375	0,11520617
1000	1,23125	0,118247145
1250	1,18	0,123382879
1600	1,17125	0,124304629
2000	1,1875	0,122603618
2500	1,065	0,136705913
3150	0,945	0,154065394
4000	0,97875	0,148752794
5000	0,89	0,163586289
6300	0,7475	0,194771635
8000	0,6875	0,211769886
10000	0,5575	0,261151205

Tabella 6.25. Tempi di riverbero e coefficienti di assorbimento divisi per frequenza

I coefficienti di assorbimento sono calcolati con la nota formula $\alpha_m = 0.161 \frac{V}{S\, RT_{60}}$. Il tempo di riverbero medio è pari a 1.02s e, come si può notare dalla tabella, è particolarmente alto soprattutto nelle frequenze del parlato; il coefficiente di assorbimento medio α_m è pari a 0.15.

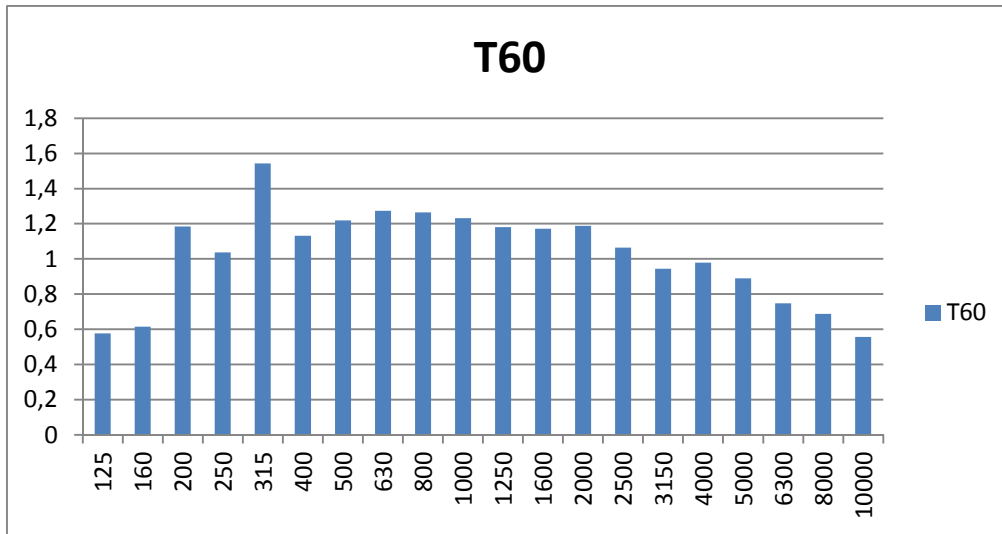



Figura 6.63. Grafico dell'andamento del tempo di riverbero in funzione della frequenza

Fatto ciò, è stato rilevato il livello di pressione sonora equivalente non ponderato con locale in attività con circa :

Frequenze (Hz)	L_p
125	42,8
160	52,3
200	56,5
250	61
315	55,8
400	66,9
500	72,2
630	71,8
800	78
1000	81
1250	77,6
1600	66,4
2000	63,1
2500	64,4
3150	67,5
4000	69,6
5000	58,2
6300	54,7
8000	51,3
10000	43,2

Tabella 6.26. Livello di pressione sonora non ponderata in funzione della frequenza con locale in attività

Anche in questo caso è palese come, nelle frequenze del parlato, il livello di pressione sonora superi i 70 dB, per un livello di pressione equivalente Lz_{eq} pari a circa 84dB, livello troppo alto perché un locale pubblico goda di un buon comfort acustico.

Calcolo degli elementi successivi

Passo successivo è quello di determinare alcuni elementi fondamentali per l'analisi acustica dell'ambiente: indice di direttività Q, costante d'ambiente R e distanza critica r_{crit} .

Q viene impostato pari a 2 in quanto le sorgenti sonore, cioè le persone presenti in sala, possono essere considerate come degli speaker rivolti verso il tavolo al quale sono seduti.

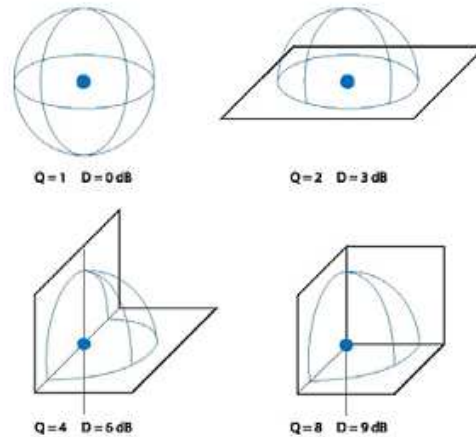



Figura 6.64. Differenti valori dell'indice di direttività

La costante R viene calcolata grazie alla formula già analizzata $R = \frac{\alpha_m}{1-\alpha_m} S$, per cui:

Freq	R
125	172,5899
160	158,8021
200	71,71677
250	83,57699
315	53,31514
400	75,53185
500	69,46133
630	66,07495
800	66,66588
1000	68,66157
1250	72,06343
1600	72,67821
2000	71,54469
2500	81,07715
3150	93,24773
4000	89,4704
5000	100,1373
6300	123,8445
8000	137,5565
10000	180,9699

Tabella 6.27. Costante d'ambiente R in funzione della frequenza

La distanza critica, definita come distanza in corrispondenza della quale la densità di energia del campo diretto è uguale alla densità di energia del campo riverberato e calcolata tramite la formula $r_{crit} = \sqrt{\frac{R_{Max}Q}{16\pi}}$, viene posta, a seguito di un arrotondamento per eccesso fatto per comodità di calcolo, uguale a 4m.
La scelta della posizione del fonometro durante le rilevazioni tiene conto di tale valore, ed infatti lo strumento è stato sempre posizionato in modo tale da essere maggiormente influenzato dal contributo del campo riverberato piuttosto che da quello diretto, come si nota dalla Figura 6.9.

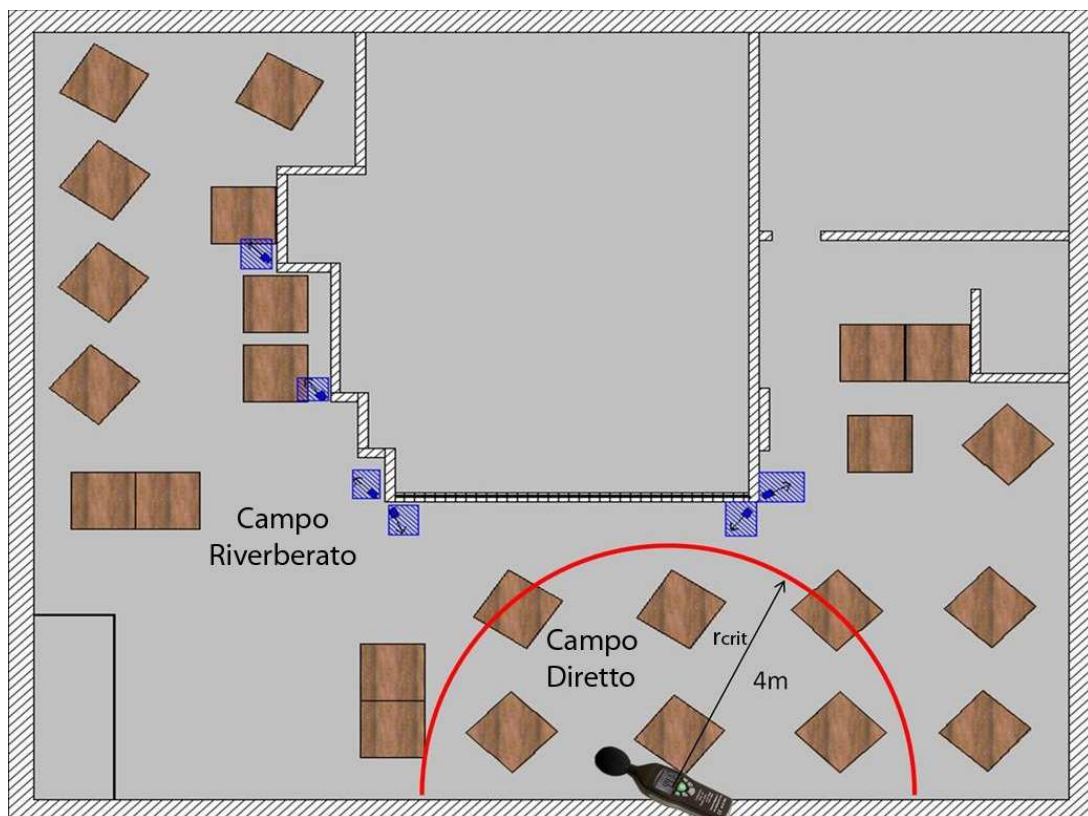



Figura 6.65. Il posizionamento del fonometro nelle rilevazioni tiene conto del valore della distanza critica

Nella misurazione descritta, il fonometro è stato posizionato al vertice della cupola della sala centrale.

Tramite gli elementi calcolati, è possibile ricavare il livello di potenza sonora L_w immessa nell'ambiente:

Freq	Lw
125	56,68699
160	65,97822
200	67,83956
250	72,83467
315	66,12876
400	78,40939
500	83,43379
630	82,86676
800	89,09665
1000	92,19526
1250	88,95545
1600	77,7834
2000	74,43164
2500	76,13798
3150	79,67668
4000	81,64875
5000	70,59359
6300	67,71182
8000	64,60099
10000	57,20259

Tabella 6.28. Livello di potenza sonora immessa nel ristorante a locale in attività

Il livello di potenza sonora immessa nell'ambiente risulta essere pari a Lw_{eq}=96.19dB.

Analisi della costante d'ambiente

Per verificare la bontà dei risultati ottenuti, si esamina il grafico dell'andamento di R in funzione della distanza equivalente dalla sorgente, definita come $\frac{r_{crit}}{\sqrt{Q}}$ e della differenza fra livello di pressione sonora rilevata ed il livello di potenza sonora immessa nel locale (L_p-L_w).

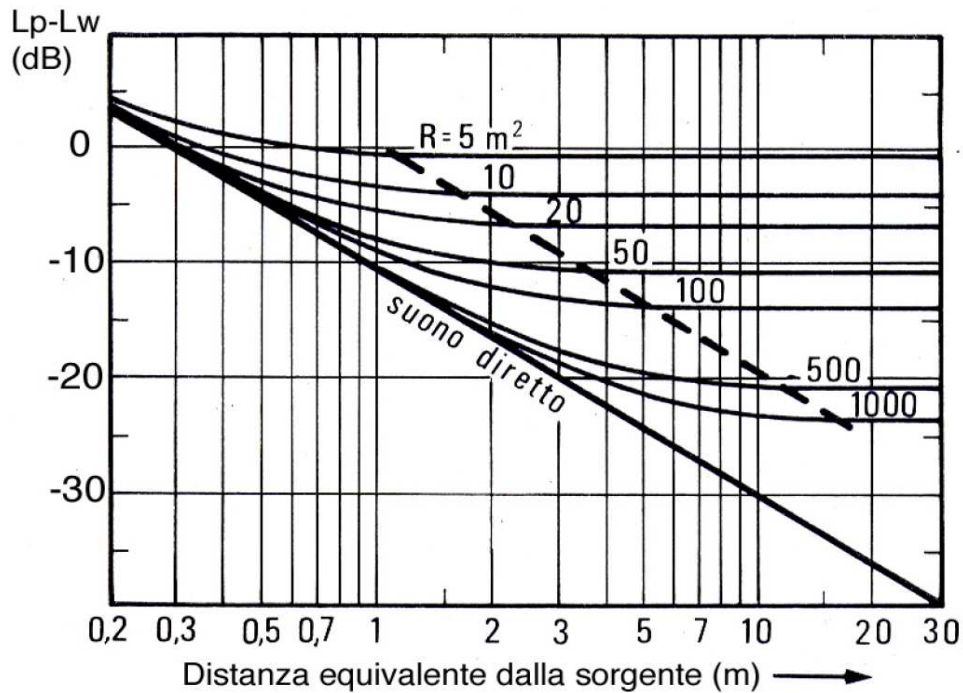



Figura 6.66. Andamento della costante d'ambiente R in funzione della distanza equivalente dalla sorgente e della differenza fra L_p e L_w

Poiché come precedentemente analizzato (Figura 6.9) il contributo del campo riverberante è più marcato rispetto a quello del campo diretto, è stato possibile esaminare i valori di R rilevati con l'andamento del grafico. Ad esempio per f=1kHz, L_p-L_w=-11.1952, per R(1kHz)=68.66, conforme all'andamento del grafico; per f=250Hz, L_p-L_w=-11.83, per R(250Hz)=83.57, conforme all'andamento del grafico.

L'analisi della costante d'ambiente è stata utile, oltre che per avere un ulteriore dato relativo alle caratteristiche acustiche dell'ambiente in esame, per poter poi ricavare i nuovi valori di coefficienti di assorbimento e tempi di riverbero che il locale avrebbe dovuto assumere a seguito dell'intervento di fonoassorbimento pianificato.

Cosiderazioni dopo i primi rilievi

Stimando di voler ottenere una diminuzione del livello di pressione sonora di$\Delta L_p = 5$dB, si ricavano tutti i valori degli elementi ambientali che si otterranno a seguito dell' intervento di fonoassorbimento, partendo dai valori della costante d'ambiente R precedentemente ricavati.

Tramite la formula $R_{new} = R10^{\frac{\Delta Lp}{10}}$, $\alpha_{medio_new} = \frac{R_{new}}{R_{new}+S}$, $T_{60_new} = 0.161\frac{V}{S\,\alpha_{medio_new}}$, con R_{new} nuova costante d'ambiente ottenuta dopo la diminuzione della pressione sonora, α_{new} nuovo coefficiente medio di assorbimento, S superficie del locale, $T60_{new}$ nuovo tempo di riverbero, si ottiene:

Freq	R_new	α_medio	T60_new
125	545,7772	0,515966	0,282173
160	502,1763	0,495157	0,294032
200	226,7883	0,306973	0,474282
250	264,2936	0,340456	0,427638
315	168,5973	0,24772	0,587728
400	238,8527	0,318109	0,45768
500	219,656	0,300218	0,484954
630	208,9473	0,289823	0,502347
800	210,816	0,291659	0,499184
1000	217,127	0,29779	0,488907
1250	227,8846	0,308	0,4727
1600	229,8287	0,309814	0,469933
2000	226,2442	0,306463	0,475072
2500	256,3885	0,33367	0,436334
3150	294,8752	0,365453	0,398387
4000	282,9303	0,355918	0,40906
5000	316,6618	0,382136	0,380994
6300	391,6306	0,433397	0,335932
8000	434,9919	0,459341	0,316958
10000	572,2772	0,527796	0,275849

Tabella 6.29. Costante d'ambiente R, coefficienti di assorbimento α e tempi di riverbero stimati dopo l'intervento

Dai grafici successivi si può intuire quanto drasticamente si debba intervenire per migliorare la condizione di vivibilità del ristorante.

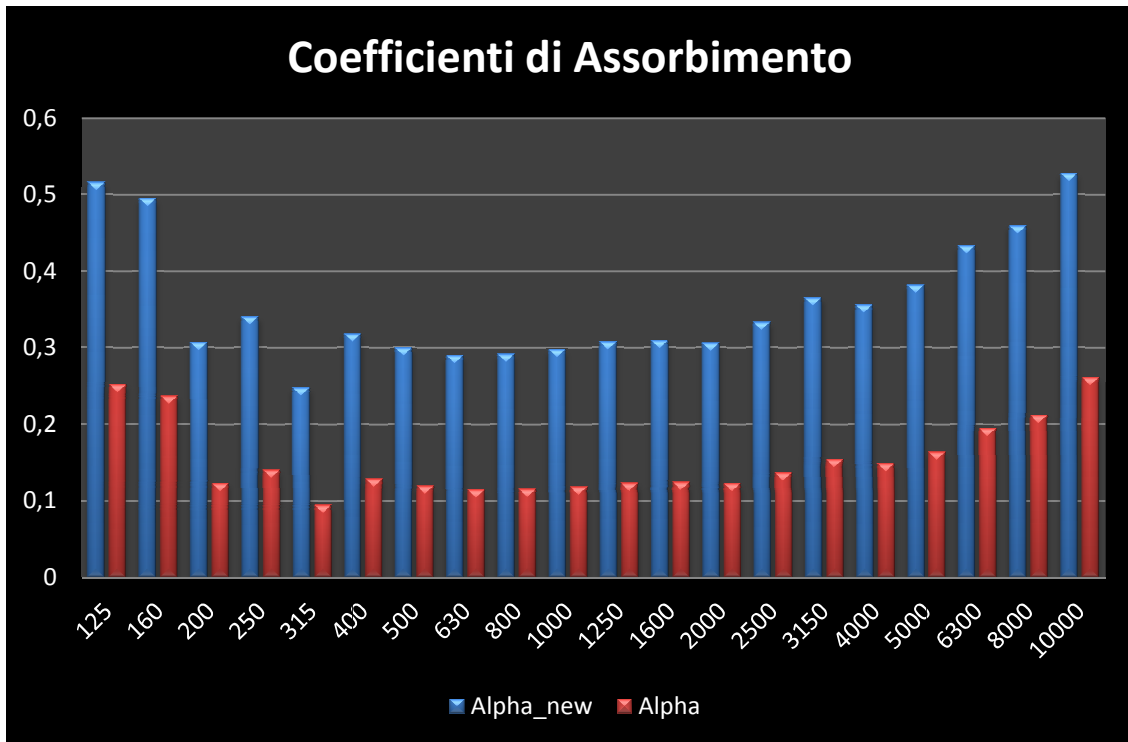



Figura 6.67. Confronto fra coefficienti di assorbimento attuali e stimati dopo l'intervento

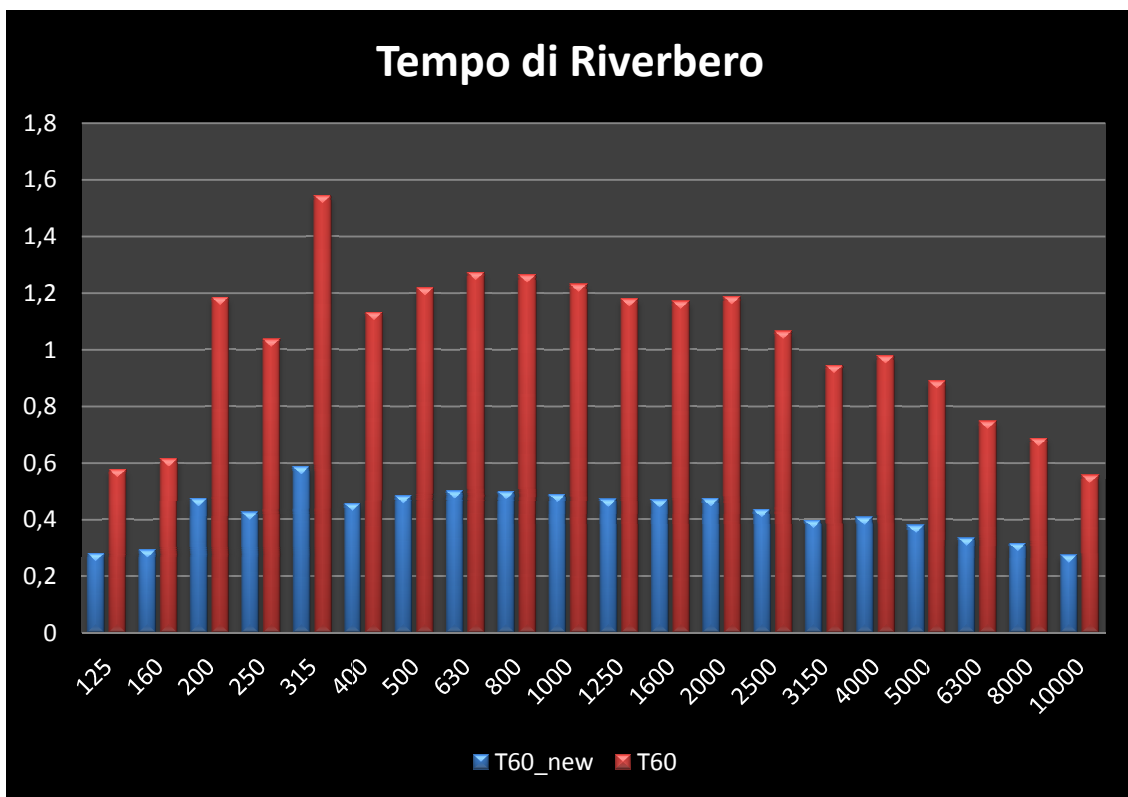



Figura 6.68. Confronto fra tempi di riverbero attuali e stimati dopo l'intervento

Terzo Rilievo: Livello pressione sonora ponderata A

Per prima cosa sono stati verificati nuovamente i tempi di riverbero del locale, ottenendo gli stessi risultati ottenuti in precedenza.

Fatto ciò, per analizzare in che modo l'orecchio umano è sensibile alle varie frequenze, si è rilevato il livello di pressione sonora equivalente ponderato A (L_pA); la misurazione è stata fatta di sabato sera, giorno tipico di tutto esaurito (si arriva ad avere in sala circa 70 commensali).

Freq (Hz)	LpA_Max
125	60
160	63,2
200	67,7
250	67,1
315	68,7
400	67,2
500	68,4
630	69,6
800	71,8
1000	69,7
1250	67,4
1600	67,8
2000	64,9
2500	63,1
3150	61,5
4000	58,7
5000	54,6
6300	51,4
8000	49,5
10000	46,6

Tabella 6.30. Livello di pressione sonora ponderato A in funzione della frequenza

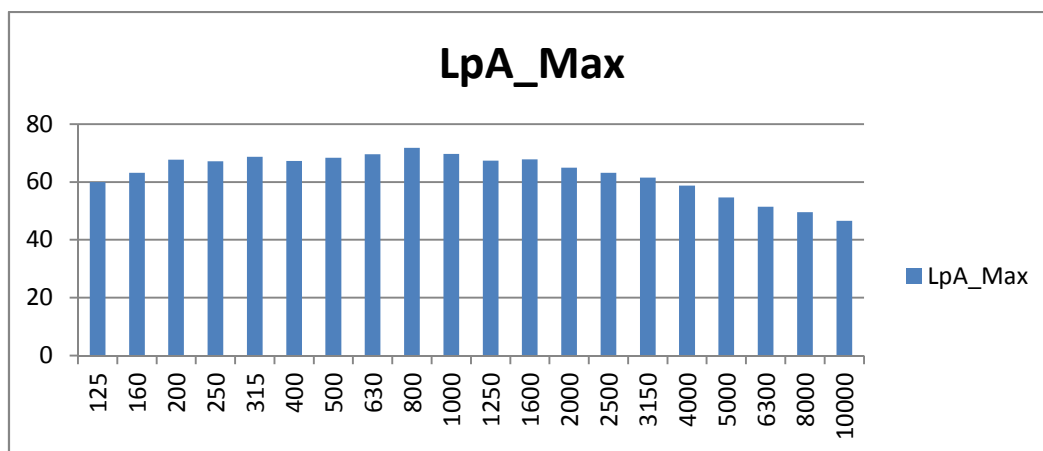



Figura 6.69. Grafico del livello di pressione sonora ponderato A in funzione della frequenza

Si è quindi giunti ad un livello di pressione equivalente ponderato A L_{Aeq} pari a circa 79 dB. Considerando Q=2 come in precedenza, alla fine della rilevazione sono stati confermati tutti i risultati ottenuti in precedenza.

Freq (Hz)	R	Alpha	T60	Lw_A
125	172,5899152	0,252107008	0,282173163	75,61048331
160	158,802082	0,236734629	0,294031704	78,55787509
200	71,71677103	0,122862276	0,47428153	80,36533817
250	83,57698682	0,140329443	0,427637935	80,31836105
315	53,31513994	0,094310476	0,58772824	80,25673393
400	75,53184758	0,128557878	0,457679573	80,05420767
500	69,46133371	0,119459936	0,484954218	80,94812051
630	66,07495271	0,114301705	0,502346746	81,96362873
800	66,66587971	0,11520617	0,499184466	84,196595
1000	68,66157325	0,118247145	0,488907064	82,20549706
1250	72,06342716	0,123382879	0,472700391	80,08297598
1600	72,67820769	0,124304629	0,4699334	80,51401559
2000	71,54469029	0,122603618	0,475072102	77,55654604
2500	81,07715379	0,136705913	0,436334198	76,20977161
3150	93,24772999	0,154065394	0,398386866	75,10492576
4000	89,47040295	0,148752794	0,409059554	72,15986411
5000	100,1372633	0,163586289	0,380994339	68,45222398
6300	123,8444663	0,194771635	0,335931883	65,96731411
8000	137,5565076	0,211769886	0,316958218	64,40760115
10000	180,969933	0,261151205	0,275848608	62,35146669

Tabella 6.31. Riepilogo dei dati ambientali che confermano i risultati ottenuti nel precedente rilievo

La conferma dei risultati ottenuti in precedenza, passa attraverso un’ulteriore verifica del grafico della costante d’ambiente R.

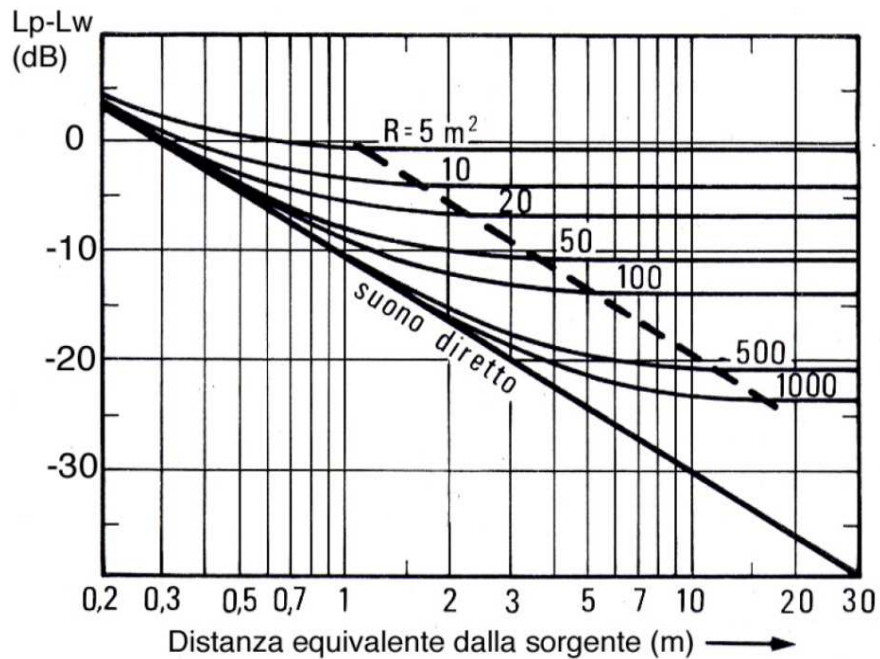



Figura 6.70. Andamento della costante d'ambiente in funzione della distanza critica e della differenza fra L_p e L_w

Passando in rassegna frequenza per frequenza, si ottiene la conferma della bontà delle nostre rilevazioni. Ad esempio per f=125Hz, L_pA-L_wA=-15.61, per R(125Hz)=172.58, conforme al grafico; per f=800Hz, L_pA-L_wA=-12.39, per R(800Hz)=66.66, conforme con l'andamento del grafico;per f=4kHz, L_pA-L_wA=-13.45, per R(4kHz)=89.47, conforme al grafico; per f=10kHz, L_pA-L_wA=-15.75, per R(10kHz)=180.96, conforme con l'andamento del grafico.

Considerando un attenuazione di 5dB (come precedentemente deciso), sono stati ricavati gli stessi valori delle caratteristiche della stanza.

Freq (Hz)	R_new	Alpha_new	T60_new
125	545,7772333	0,515966137	0,282173163
160	502,1762764	0,495156797	0,294031704
200	226,7883429	0,306973364	0,47428153
250	264,2936383	0,340455757	0,427637935
315	168,597276	0,247719587	0,58772824
400	238,8526742	0,318108575	0,457679573
500	219,6560238	0,300217611	0,484954218
630	208,9473469	0,289823311	0,502346746
800	210,8160221	0,29165931	0,499184466
1000	217,1269592	0,297790332	0,488907064
1250	227,8845658	0,308000162	0,472700391
1600	229,8286726	0,309813682	0,4699334
2000	226,2441758	0,306462527	0,475072102
2500	256,3884722	0,333670378	0,436334198
3150	294,8752134	0,365453305	0,398386866
4000	282,9302565	0,355918339	0,409059554
5000	316,6618305	0,382136378	0,380994339
6300	391,6305891	0,433396782	0,335931883
8000	434,9918709	0,45934066	0,316958218
10000	572,2771764	0,527796018	0,275848608

Tabella 6.32. Costante d'ambiente R, coefficienti di assorbimento α e tempi di riverbero stimati dopo l'intervento

Conclusioni

Nuovi rilievi sono stati successivamente effettuati con le stesse modalità, ottenendo gli stessi risultati mostrati in precedenza.

Quarto Rilievo: Analisi livello di pressione sonora generata dalla musica

Prima di pianificare un qualunque intervento, si è notato come, durante il servizio, nel locale fosse presente musica di sottofondo diffusa da sei altoparlanti. Si è quindi deciso di analizzare quanto la musica influenzi il livello di pressione sonora durante una serata di lavoro.

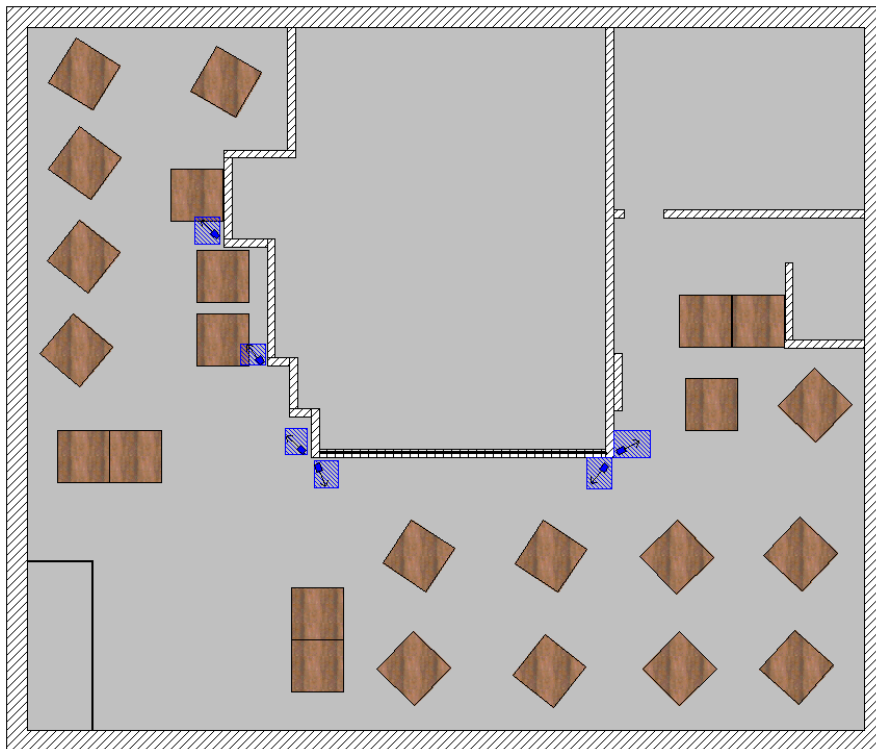



Figura 6.71. In blu sono evidenziati gli speaker e la loro direttività all'interno del locale

Per fare ciò sono state fatte delle misurazioni ad esercizio chiuso, misurando il livello di pressione sonora accendendo e spegnendo il sistema di diffusione in tre aree del locale: la sala alla sinistra dell'ingresso principale, sotto la cupola, nella zona in cui è presente il bar.

Misurazione a musica spenta

Ad esercizio diurno chiuso, con sistema di diffusione spento, senza presenza alcuna se non quella della persona atta ad effettuare le rilevazioni, il fonometro è stato posizionato in ciascuna delle aree sopra evidenziate, ottenendo i seguenti risultati:

Freq (Hz)	Lzeq_Sx	Lzeq_Cup	Lzeq_Bar
125	35,3	38	37,3
160	33,8	35	35,1
200	34,1	35,9	37,7
250	32,6	35	37,5
315	28,7	37,4	33
400	29,7	39,7	31,7
500	27,4	39,3	28,9
630	25,5	30,8	25,6
800	26,4	36,2	23,9
1000	25,7	29,4	23,8
1250	23,1	28,2	22,2
1600	20,9	25,9	20,2
2000	19,8	24,3	21,8
2500	19,6	24,9	19,5
3150	17,1	22,4	19,1
4000	15,5	21,3	18,1
5000	14,7	21,4	16,1
6300	13,3	17,3	14,3
8000	12,6	13,9	13
10000	11,9	12,8	12
12500	11,5	12,1	11,7
16000	11	11,5	11,2
20000	10,7	10,8	10,7

Tabella 6.33. Livello di pressione sonora non ponderato nelle tre diverse zone del ristorante in funzione della frequenza a musica spenta

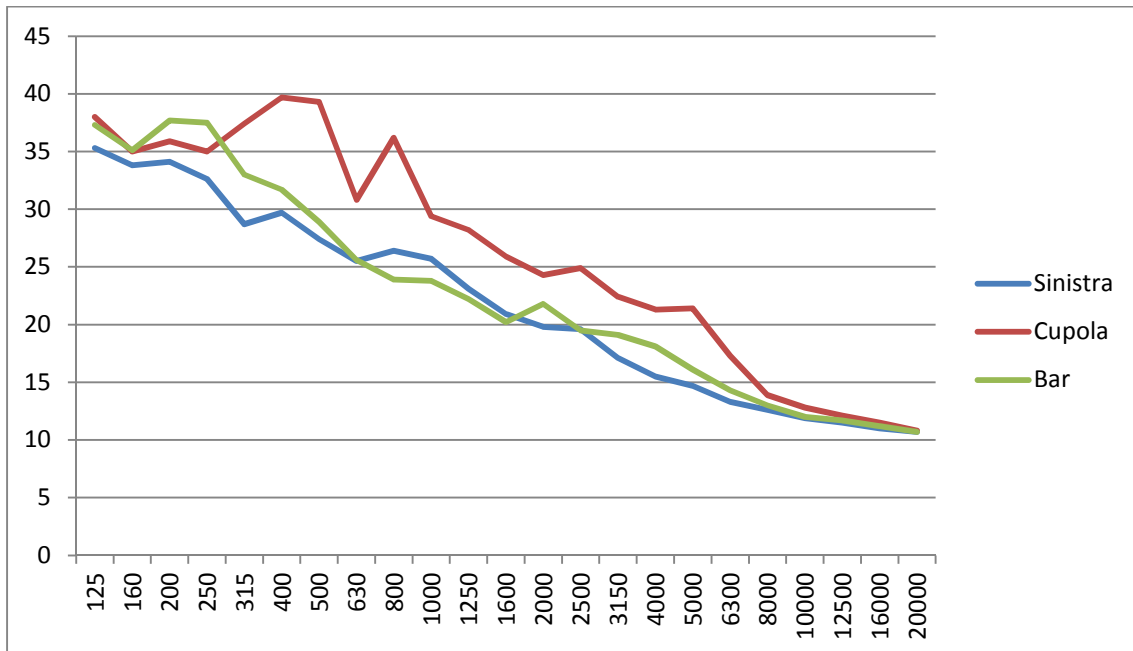



Figura 6.72. Grafico dell'andamento del livello di pressione sonora non ponderato nelle varie zone del locale a musica spenta

Dalle misurazioni risulta chiaro come, in situazione di assoluto silenzio, la parte acustica più sensibile sia la cupola.

Misurazione a musica accesa

Le modalità di rilevazione sono le stesse usate a musica spenta; il risultato è il seguente:

Freq (Hz)	Lzeq_Sx	Lzeq_Cup	Lzeq_Bar
125	50,8	49,8	52,6
160	50,4	48,4	44,8
200	53,6	52,3	47,2
250	55,9	50,4	48,6
315	54,4	56,4	56,3
400	48,9	49,8	48,6
500	44,5	45	43,8
630	51,9	48	49,6
800	49,1	49,6	48,8
1000	49,4	47,5	47,8
1250	54,2	51,5	50,4
1600	51,3	49,6	49,9
2000	45,2	44,7	43,9
2500	43,4	43,7	42,2
3150	41,6	41,4	40,1
4000	39,2	39,3	37,5
5000	40,5	40	37,8
6300	40,8	39,6	38,6
8000	41,4	39,8	38,2
10000	40,4	38,6	35,5
12500	32,9	31,7	28,2
16000	22,7	24	20,8
20000	14,2	12,6	12,1

Tabella 6.34. Livello di pressione sonora non ponderata nelle tre zone del locale a musica accesa

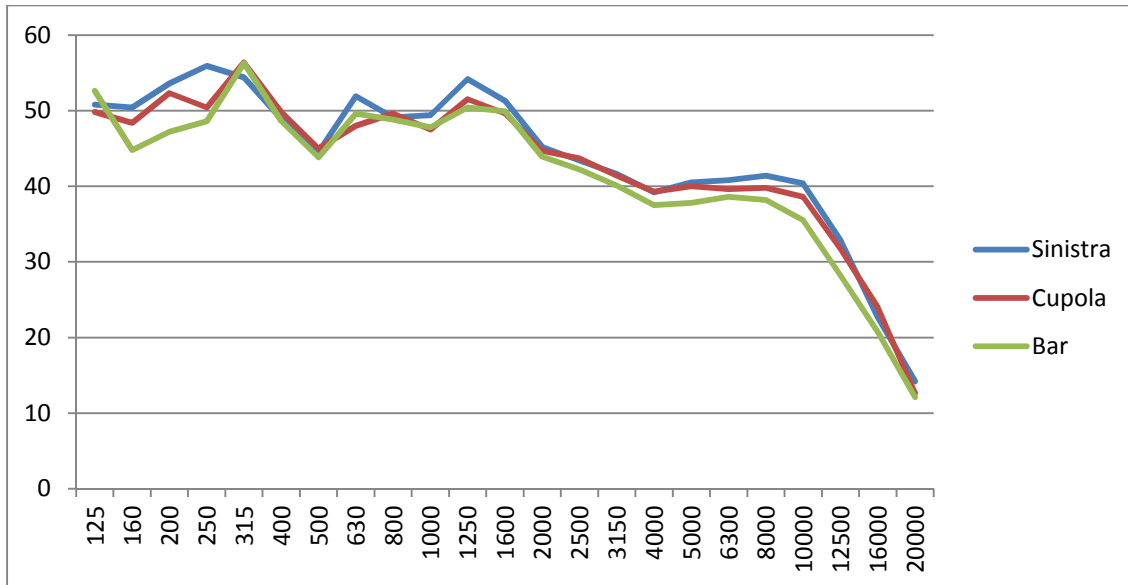



Figura 6.73. Grafico dell'andamento del livello di pressione sonora non ponderato nelle tre zone del locale a musica accesa

Con la musica accesa si nota come tutti e tre gli ambienti si comportino allo stesso modo; ciò sta a significare che, nonostante un'iniziale preoccupazione dovuta al comportamento della cupola, non è possibile concentrarsi solo su quell'area, ma sarà l'intero locale a dover essere migliorato.

Analisi dei risultati

Riassumendo, dai dati rilevati si può dire che il livello di pressione sonora diurno ad esercizio chiuso, ipotizzabile come rumore di fondo, a musica spenta è:

$$L_{z_{eq}} = 49.47\ dB$$

Il livello di pressione sonora diurno ad esercizio chiuso con la musica accesa è:

$$L_{z_{eq}tot} = 67\ dB$$

In generale si può dire che quest'ultimo livello rilevato, non è altro che la combinazione tra il rumore di fondo e il livello sonoro dato dalla musica, per cui:

$$L_{z_{eq}tot} = 10Log\left(10^{\frac{L_{z_{eq}}}{10}} + 10^{\frac{L_{z_{eq}mus}}{10}}\right)$$

Da cui, sviluppando e semplificando l'espressione, si ricava il livello di pressione sonora portato dalla musica:

$$L_{z_{eq}mus} = 10Log\left(10^{\frac{L_{z_{eq}tot}}{10}} - 10^{\frac{L_{z_{eq}}}{10}}\right) = 66.92\ dB$$

Si può quindi affermare che il rumore di fondo non influenza in modo significativo il livello di pressione sonora totale, in quanto il suo contributo è stimabile a meno di 1 dB; detto ciò, è possibile, approssimando i risultati ottenuti, affermare che $L_{z_{eq}tot} = L_{z_{eq}mus}$.

Contributo della musica sul livello di pressione sonora ad esercizio aperto

Il passo successivo è stato quello di analizzare se la musica influenzi in maniera significativa il livello di pressione sonora generale ad esercizio aperto. A questo proposito sono state effettuate due ulteriori rilevazioni.

1. *Martedì 17 Aprile:* con un numero di persone all'interno del locale pari a 25, è stata rilevata una pressione sonora pari a 73.7 dB; l'intensità sonora risulta quadruplicata rispetto a quanto riscontrato ad esercizio chiuso e , considerando che nella sala ci sono 6 altoparlanti, è come se in quella serata ci fossero stati 24 altoparlanti.

2. *Sabato 21 Aprile:* con un numero di persone all'interno del locale che è arrivato ad un massimo compreso fra 60 e 70, sono stati rilevati 77.08 dB; l'intensità sonora è quindi aumentata di otto volte rispetto a quanto riscontrato ad esercizio chiuso, ed è come se in sala ci fossero stati 48 altoparlanti.

I risultati ottenuti confermano quanto in realtà intuito durante le misurazioni; era infatti molto difficile percepire la musica all'interno del ristorante, ed i numeri hanno dato conferma del fatto che eliminarla avrebbe sortito un effetto minimo nella diminuzione generale del livello di pressione sonora, ma avrebbe anzi privato i clienti di quella piacevole sensazione che si ha quando si cena con un sottofondo musicale.

Quinto Rilievo: Misurazione con sorgente omnidirezionale

Un'ultima rilevazione è stata fatta utilizzando un altoparlante dodecaedrico che simulasse una sorgente omnidirezionale; lo speaker è stato posizionato sul primo tavolo a sinistra rispetto l'ingresso principale, ed ha generato un rumore rosa (Figura 6.17) con un intensità sonora di 100dB.

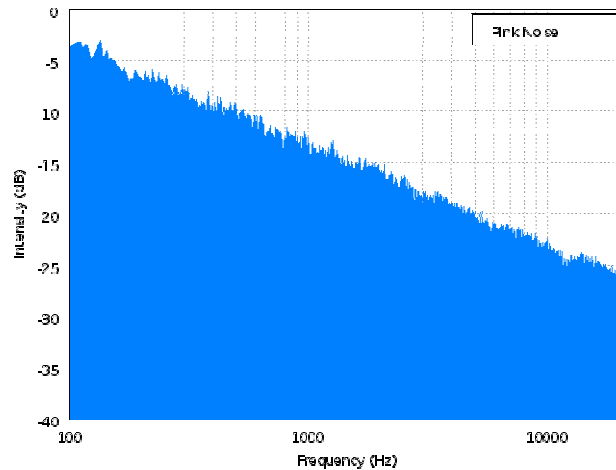



Figura 6.74. Rumore Rosa

Il fonometro ha attraversato tutto il locale, partendo dalla zona appena davanti l'uscita posteriore, fino ad arrivare in fondo alla sala di sinistra.

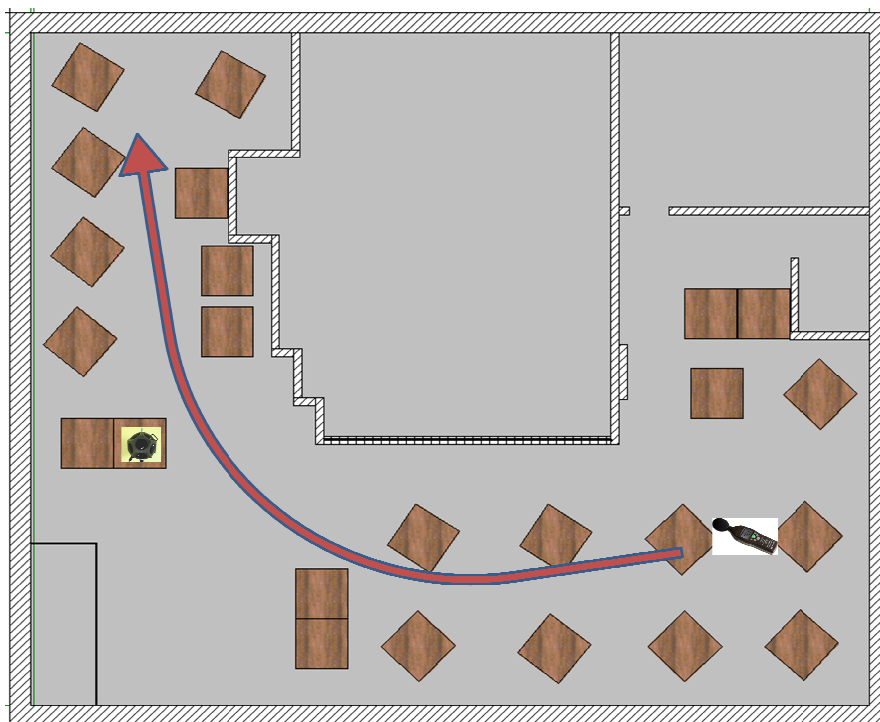



Figura 6.75. Spostamento del microfono durante la rilevazione

I risultati sono riassunti dal seguente grafico:

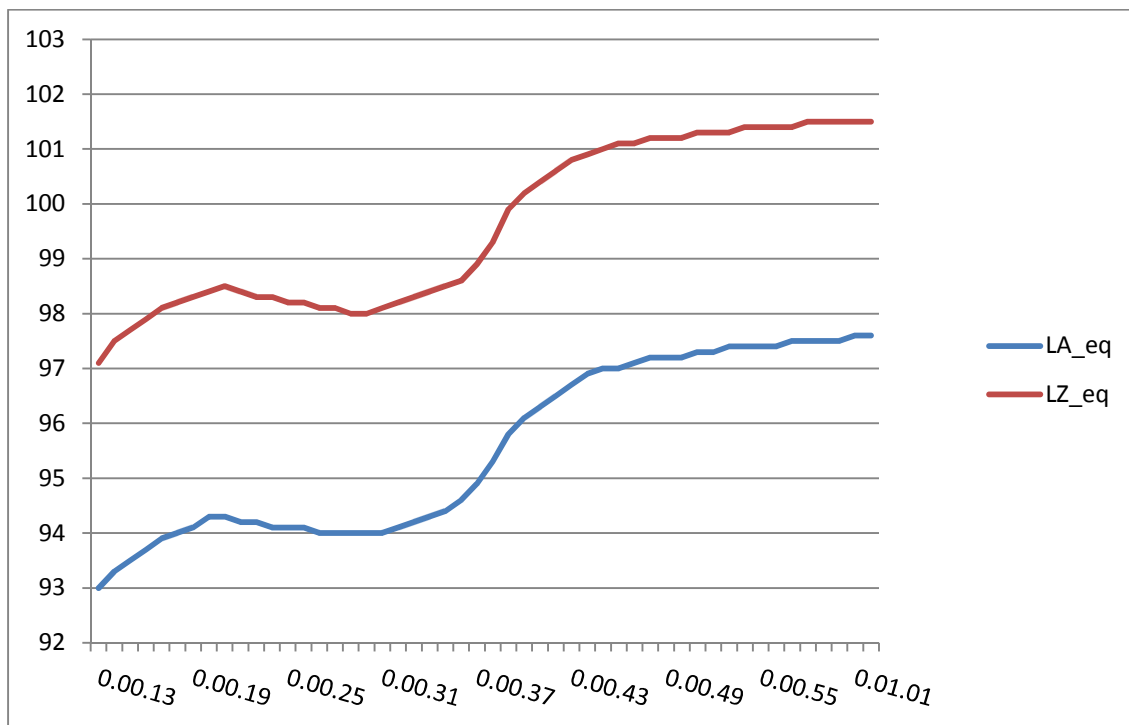



Figura 6.76. Grafico dell'andamento del livello di pressione sonora equivalente (ponderato e non), in funzione del tempo

Si può notare come il livello di pressione si aggiri intorno ai 97dB, si alzi poi sotto la cupola avvicinandosi ai 100 dB, per poi toccarli e per poco superarli una volta che il fonometro si trova nella sala di sinistra. Questo dipende dalla distanza dalla sorgente: inizialmente la distanza è maggiore della distanza critica (r_{crit}), per cui il fonometro registra il contributo del campo riverberato; in seguito è minore, a causa del fatto che è stato rilevato il solo contributo del suono diretto.

Pianificazione intervento di correzione acustica

Partendo dalle analisi effettuate, è stato possibile calcolare il coefficiente di assorbimento medio della stanza α_i e successivamente di quanto deve essere incrementato per avere α_f ed ottenere la diminuzione voluta del tempo di riverbero.

$$\begin{cases} \alpha_i = 0.15 \\ \alpha_f = 0.36 \end{cases}$$

L'area della superficie sulla quale si opera ha un'estensione S=512m^2.

Analizzando i vari materiali fonoassorbenti, cercando di combinare un buon effetto fonoassorbente ed una buona resa estetica, così da non alterare la fisionomia del locale, si è deciso di utilizzare due materiali:

- *Microsorber®:* sarà il materiale prevalentemente utilizzato per ricoprire soffitti e finestre e superfici vetrate; si utilizzeranno due fogli distanziati fra loro 3cm e lontani 5cm dalla parete.

Figura 6.77. Grafico dell'andamento del coefficiente di assorbimento del materiale in funzione della frequenza

- *Acustideco®:* pannelli fonoassorbenti di questo materiale saranno utilizzati invece sulle pareti.

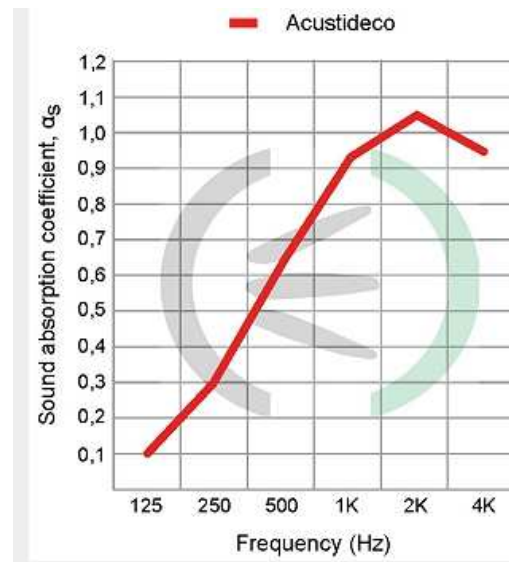



Figura 6.78.Grafico dell'andamento del coefficiente di assorbimento del materiale in funzione della frequenza

Considerando la combinazione dei due materiali per le frequenze d’interesse (400-4kHz), è possibile stimare un coefficiente medio di assorbimento combinato α_m=0.7.

Calcolo area effettiva di assorbimento

Prima di analizzare l'area effettiva sulla quale operare, bisogna tener conto che l'area trattabile non deve tener conto del pavimento, poiché è impossibile ivi operare; sapendo che l'area totale S=512m^2 e che l'area del pavimento $S_{pavimento}$=129m^2, l'area sfruttabile per l'intervento di fono assorbimento si riduce a S-$S_{pavimento}$=383m^2.

Per prima cosa è bene calcolare l'area efficace sia per il coefficiente di assorbimento rilevato α_i, che per quello che si vuole ottenere α_f, per cui

$$\begin{cases} A_i = \alpha_i S = 0.15 \cdot 512 = 76.8m^2 \\ A_f = \alpha_f S = 0.36 \cdot 512 = 184.32m^2 \end{cases}$$

La qual cosa sta a significare che 184.32m^2 di superficie hanno coefficiente di assorbimento pari a 1.
Una volta determinato ciò, si calcolano quanti metri quadri di materiale fonoassorbente si devono utilizzare per arrivare a tale risultato:

$$S' = \frac{A_f}{\alpha_m} = 263.32m^2$$

Ciò significa che si avranno 263.32m^2 con coefficiente di assorbimento 0.7 e 248.68m^2 con 0.15.

$$(263.32m^2; 0.7) + (248.68m^2; 0.15)$$

Quindi 248.68*0.15=37.302m^2 di superficie hanno α=1.

Calcolando poi che $\frac{37.302}{0.7} = 53.288m^2$, è possibile affermare che 248.68m^2 ad α=0.15 equivalgono a circa 53.288m^2 ad α=0.7.

Tirando le somme, si dovranno ricoprire di materiale fonoassorbente 263.32 – 53.288 = 210m^2 di superficie circa.

Considerazioni pratiche

Dopo un'analisi più approfondita delle geometrie dell'ambiente, avendo leggermente modificato il progetto per volontà del cliente, si è cercato di non stravolgere eccessivamente il design del locale; per questo motivo si tenderà a ricoprire di materiale fonoassorbente 134m^2 di superficie, il che porterà ad una riduzione del livello di pressione sonora di 3dB, due in meno rispetto a quanto in precedenza pianificato.

Conseguentemente, si è stimato di:

- Diminuire il tempo di riverbero medio a 0.58 sec. (contro gli 0.42 sec. inizialmente progettato).
- Aumentare il coefficiente di assorbimento medio α_m=0.26 (contro gli 0.36 inizialmente progettato).
- Incrementare la costante d'ambiente in maniera meno marcata.

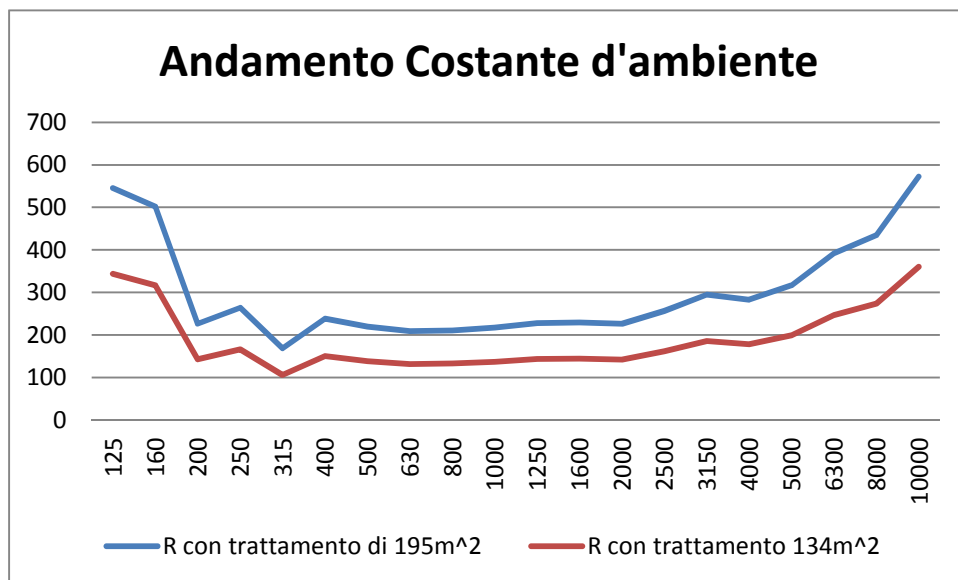



Figura 6.79. Grafico andamento della costante d'ambiente R a seconda della vastità dell'intervento.

Nonostante ciò, si è comunque stimato di raggiungere un buon livello di confort acustico.

Capitolo 7

Installazione di Microsorber®

I lavori in loco

La prima fase pratica del progetto ha riguardato l’installazione di pellicole di Microsorber® in PVC lucide e translucide su tutti i soffitti ed i vetri del locale.

Per prima cosa sono stati inseriti tutti gli inserti nei soffitti e nelle finestre.

Figura 7.80. Inserti per finestre e pareti

Successivamente sono stati tagliati ed appesi i fogli di Microsorber®.

Figura 7.81. Taglio dei fogli di Microsorber

Figura 7.82. Dettaglio occhiello inserito agli angoli dei vari fogli

Figura 7.83. Installazione della pellicola di Microsorber® nella sala bar

Figura 7.84. Installazione della pellicola di Microsorber nella cupola

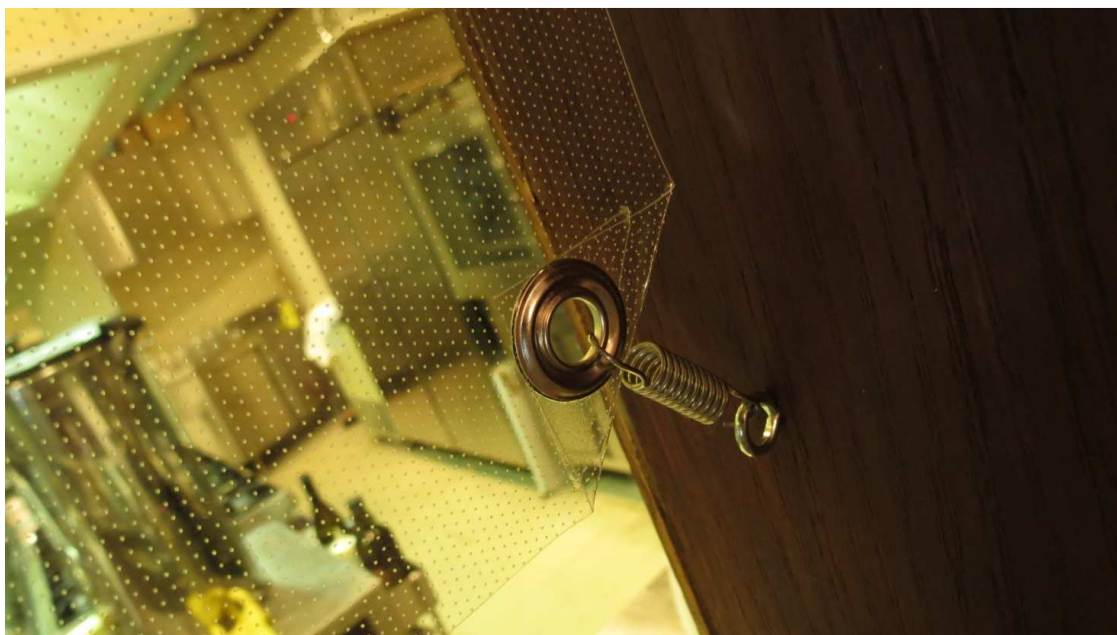



Figura 7.85. Dettaglio di un foglio di Microsorber®. L'occhiello è collegato all'inserto tramite una molla, così che il foglio rimanga teso

Figura 7.86. Dettaglio installazione della pellicola di Microsorber®; bisogna fare attenzione affinchè il foglio non si pieghi

Figura 7.87.Pellicola applicata ad una delle vetrate della cucina; il foglio, affinchè il materiale funzioni, deve trovarsi almeno a 3cm dalla superficie trattata

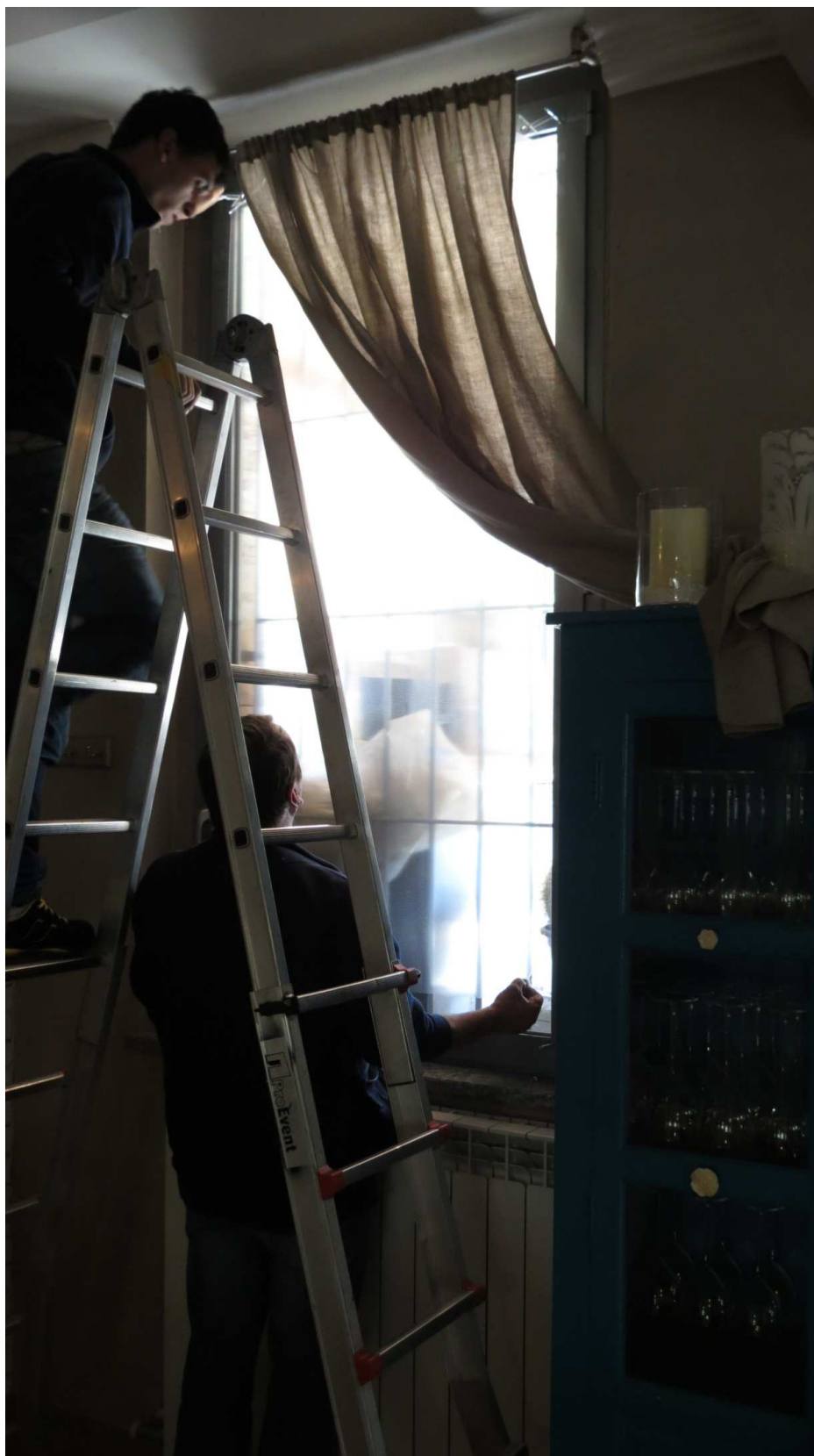



Figura 7.88. Installazione della pellicola translucida alla finestra

Figura 7.89. Installazione della pellicola translucida di Microsorber® all'uscita di sicurezza

Figura 7.90. Zona bar; sul soffitto è stata installata la pellicola di Microsorber® in doppio strato

Figura 7.91. Sala di sinistra; anche qui, come in tutti i soffitti, è stata installato un doppio strato di pellicola Microsorber®

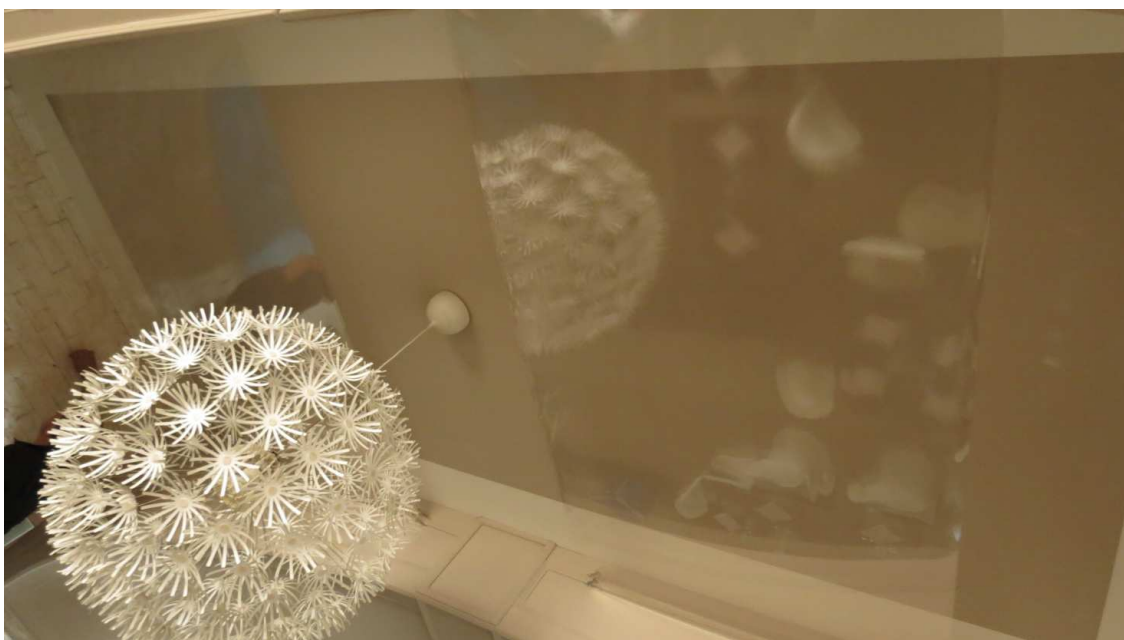



Figura 7.92.Sala di sinistra; anche qui, come in tutti i soffitti, è stata installato un doppio strato di pellicola Microsorber®

Rilievi dopo l'installazione

Dopo questa prima fase, sono stati ricoperti circa 96m^2 di superficie utilizzando circa 160m^2 di pellicole lucide e translucide di Microsorber®, per un abbassamento di pressione sonora stimato di poco più di 2dB.

Prima verifica: rilievo con sorgente omnidirezionale

Dopo la posa del Microsorber® è stata fatta una rilevazione per verificare quale fosse il contributo, a livello di riduzione di pressione sonora, portato dal solo materiale fonoassorbente in questione.
A tale scopo, come fatto in periodo di analisi ambientale, è stato utilizzato un altoparlante dodecaedrico, posizionato sul primo tavolo della sala a sinistra rispetto l'ingresso, che emettesse rumore rosa con intensità di 100dB.

Il fonometro ha attraversato tutto il locale, partendo dalla zona appena davanti l'uscita posteriore, fino ad arrivare in fondo alla sala di sinistra.

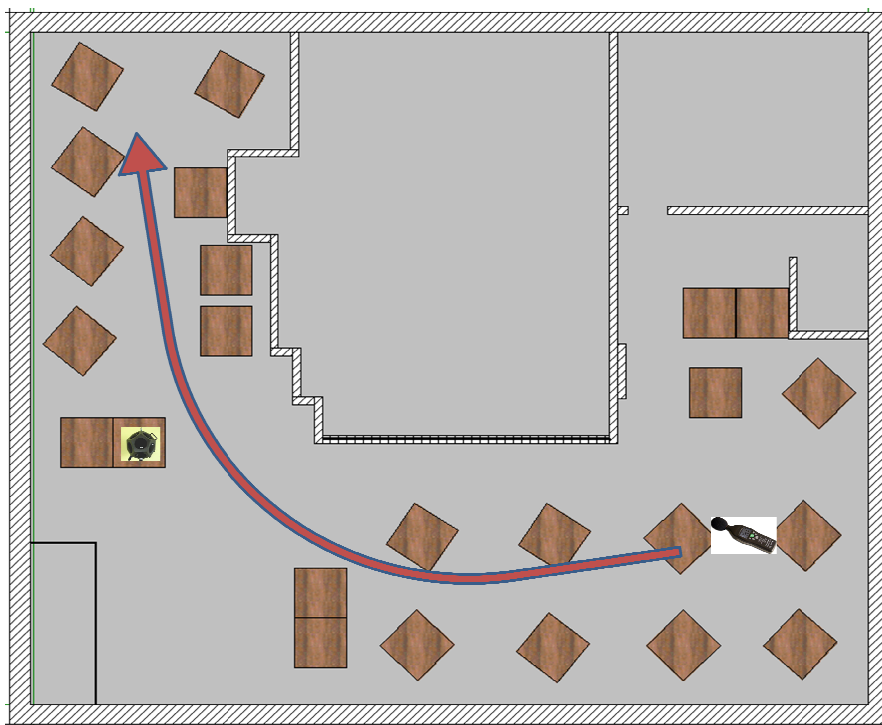



Figura 7.93. Spostamento del fonometro durante la misurazione

I risultati sono riassunti nel seguente grafico:

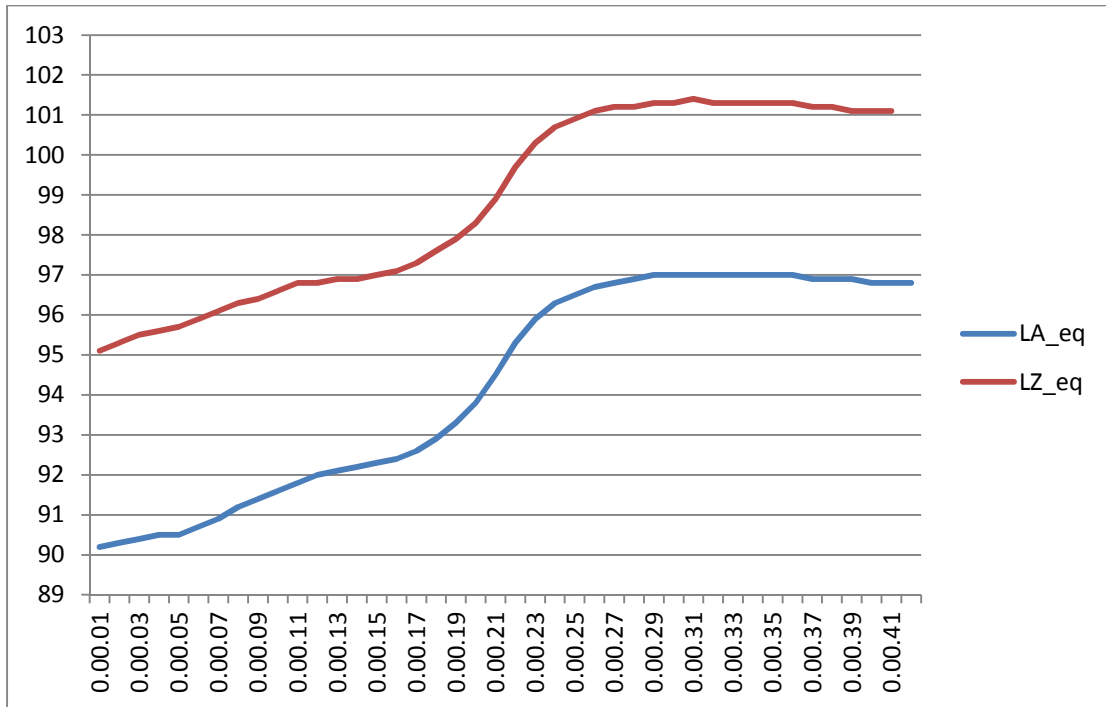



Figura 7.94. Grafico dell'andamento del livello di pressione sonora ponderata A e non ponderata in funzione del tempo

Così come nella misurazione precedente, si nota come, fintanto che ci si trova ad una distanza dallo speaker maggiore della distanza critica r_{crit} , è possibile osservare l’effetto del Microsorber® sul campo riverberato; avvicinandosi alla sorgente, la componente diretta è l’unica che influenzi il fonometro.
E’ possibile osservare il miglioramento portato dal materiale fonoassorbente rispetto la situazione di partenza.

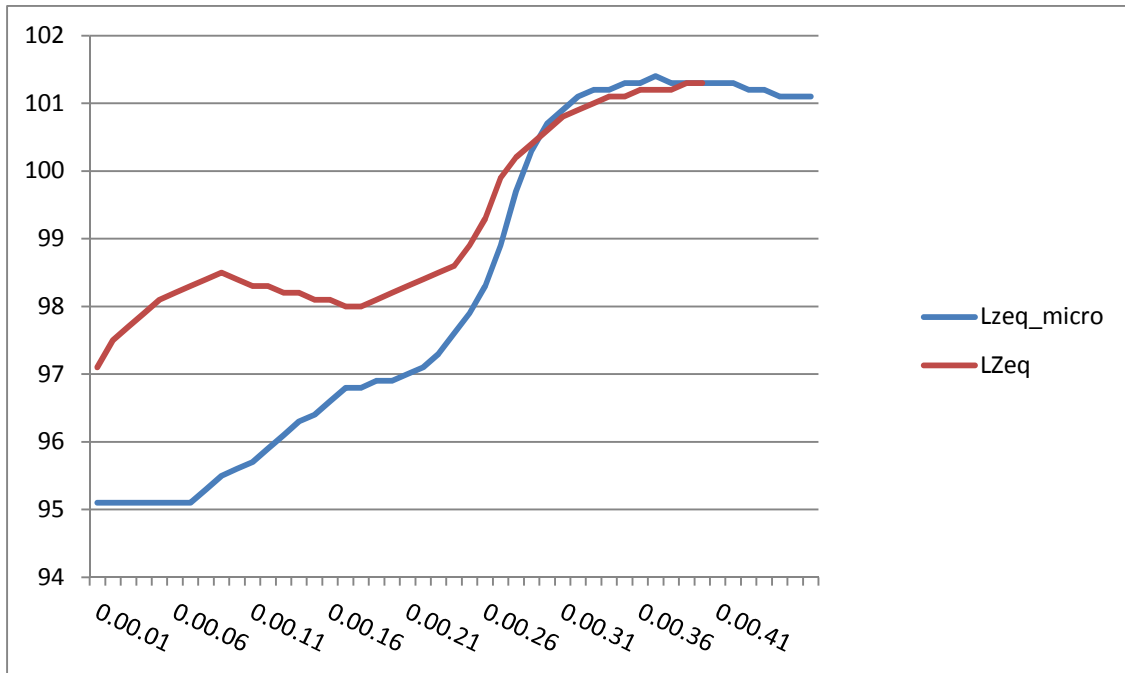



Figura 7.95. Grafico comparativo del livello di pressione sonora non ponderato prima e dopo l'installazione della pellicola Microsorber®

Nonostante alcuni aggiustamenti al grafico dovuti alla differente durata dei due test, al di la della zona in cui il suono diretto è predominante (in cui si attesta intorno ai 101dB), si può notare come fin dal principio si sia rilevata una diminuzione del livello di pressione sonora di poco più di 2dB, esattamente come preventivato in fase di analisi.

Si può inoltre vedere come in fondo alla sala di sinistra, ai limiti quindi della distanza critica, il livello di pressione sonora si abbassi a 101dB, dimostrando l’inizio della zona di lavoro del Microsorber®.

Seconda verifica: rilievo tempo di riverbero

La prima verifica, eseguita secondo le modalità già seguite in precedenza, è stata la misurazione del tempo di riverbero.

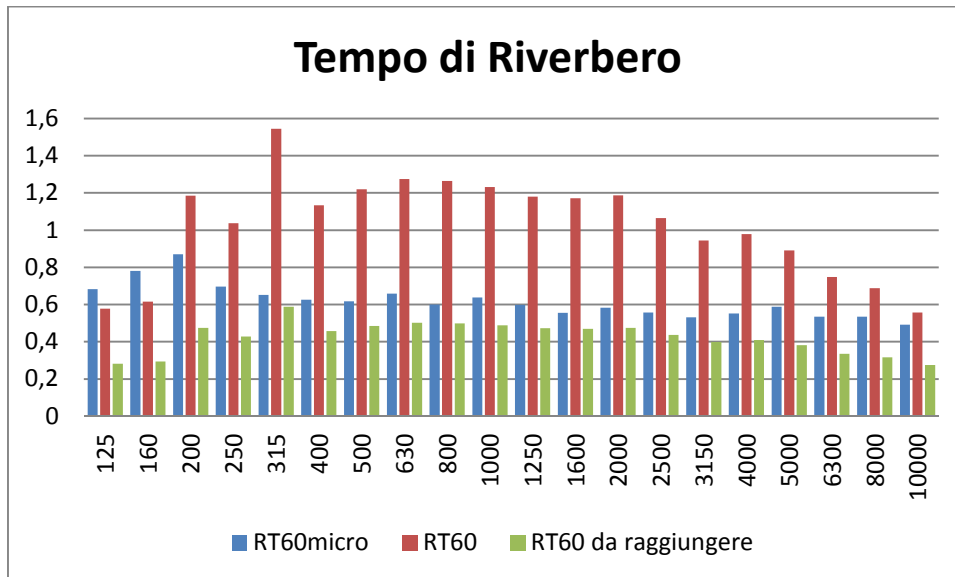



Figura 7.96. Grafico dell'andamento dei tempi di riverbero in funzione della frequenza

Come si nota dal grafico, soprattutto nelle frequenze del parlato (400-4k Hz), i risultati raggiunti dopo questa prima fase sono incoraggianti, e non si discostano di molto rispetto a quanto si era inteso ottenere a fine lavori.

Terza Verifica: rilievo livello di pressione sonora (L_Z)

La seconda verifica è stata la rilevazione del livello di pressione sonora ad esercizio aperto, con la presenza di 50 persone all'interno del locale.

Frequenze (Hz)	L_p
125	54,6
160	62,2
200	66,7
250	68,6
315	70,7
400	69
500	69,9
630	71,3
800	70,7
1000	71,6
1250	70,8
1600	69,8
2000	66
2500	64,7
3150	62,1
4000	59,6
5000	52,7
6300	49,4
8000	49,6
10000	46,7

Tabella 7.35. Livello di pressione sonora non ponderata in funzione della frequenza ad esercizio aperto

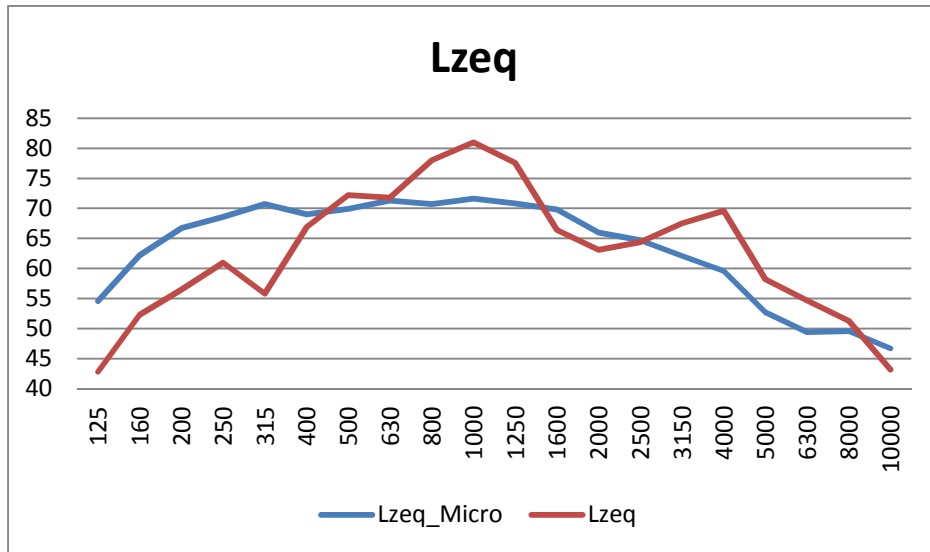



Figura 7.97. Grafico comparativo del livello di pressione sonora non ponderata prima e dopo l'installazione della pellicola Microsorber® ad esercizio aperto

È stato quindi rilevato un livello di pressione sonora equivalente Lz_{eq} pari a circa 81 dB. Rispetto alle misurazioni precedentemente effettuate, è stato riscontrato un miglioramento del livello di pressione sonora equivalente Lz_{eq} in condizioni simili, che è passata da circa 85 dB a circa 81 dB.

La bontà del lavoro fatto è stata confermata anche dal calcolo della costante dell'ambiente R.

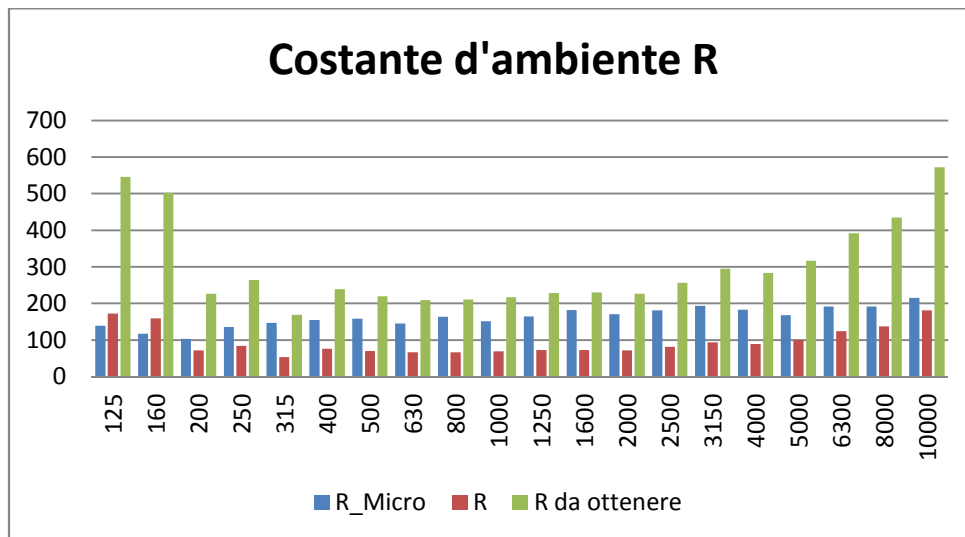



Figura 7.98. Grafico dell'andamento della costante d'ambiente R in funzione della frequenza

Come per i tempi di riverbero, anche in questo caso, per frequenze comprese fra 400-4k Hz, i risultati ottenuti non si discostano troppo da quelli prefissati.

Quarta Verifica: rilievo livello di pressione sonora ponderato A (L_A)

La terza verifica è stata il livello di pressione sonora ponderata A ad esercizio aperto, con la presenza di 61 persone all'interno del locale.

Frequenze (Hz)	L_p
125	56.7
160	58.6
200	60.2
250	60.1
315	61.7
400	63.7
500	64.6
630	62.8
800	62.7
1000	60.7
1250	59.2
1600	58.1
2000	55.8
2500	55.2
3150	53.3
4000	50.4
5000	48.1
6300	46.3
8000	45
10000	42

Tabella 7.36. Livello di pressione sonora ponderata A in funzione della frequenza

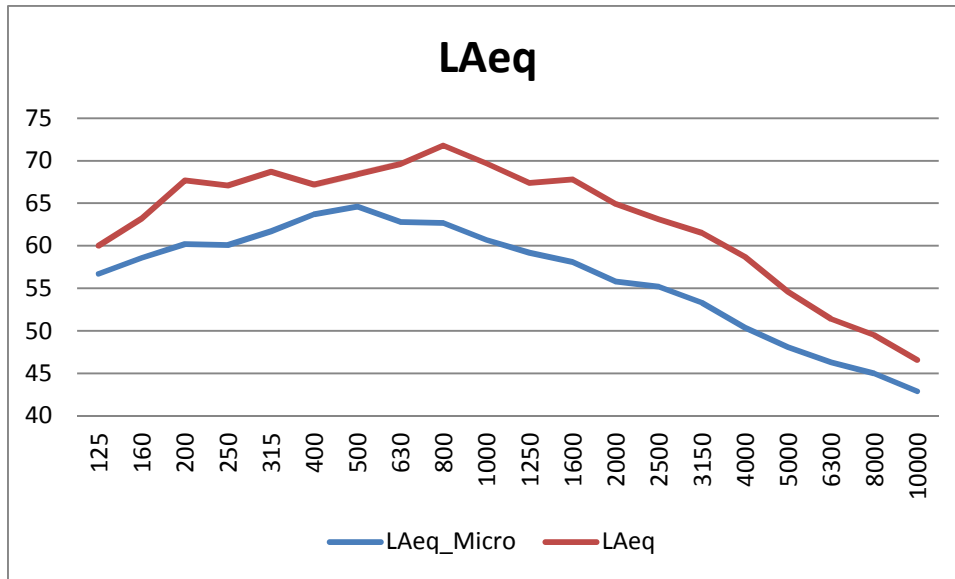



Figura 7.99.Grafico comparativo del livello di pressione sonora ponderata A prima e dopo l'installazione della pellicola Microsorber® ad esercizio aperto

Rispetto alle misurazioni precedentemente effettuate, è stato riscontrato un miglioramento del livello di pressione sonora equivalente LA_{eq} in condizioni simili, che è passata da circa 79 dB a 73 dB.

Anche in questo caso sono stati ottenuti gli stessi risultati precedenti.

Conclusioni

Dalle rilevazioni fatte è stato notato come solamente dopo questa prima fase di lavori ci sia stato un miglioramento del confort acustico, attestato fra l’altro dagli stessi clienti che hanno espresso apprezzamento per la riduzione del rumore e per l’aumento dell’intelligibilità del parlato tra i diversi tavoli.

La cosa più importante è senza dubbio la riduzione di pressione sonora rilevata ben oltre i 3 dB, il che sembrerebbe confermare l’ipotesi di partenza secondo la quale sia possibile sfruttare l’effetto Lombard negli interventi di fonoassorbimento.

Se infatti si guarda in dettaglio il livello di pressione sonora nella banda di frequenza 400 – 4kHz (zona in cui l’effetto di Microsorber® è piu’ pronunciato), si può notare come L_{Zeq} passi da 84,87 dB a 79,46 dB (-5,5 dB circa), mentre L_{Aeq} sia passato da 78 dB a circa 71 dB (-7 dB circa).

Capitolo 8

Installazione Acustideco®

Analisi Tela di Rivestimento

Una volta terminata la prima fase di lavori, si è passati ad esaminare i pannelli fonoassorbenti Acustideco®.

Per prima cosa si è dovuto decidere con quale materiale ricoprire i pannelli; sono state quindi effettuate due prove con due diversi tessuti: 100% Cotone e 100% Poliestere. In pratica è stato misurato il tempo di riverbero di una stanza di dimensioni 3.37x2.32x3.94m, perimetro P=12.52m, superficie S=60.474m^2 e volume V=30.8045m^3, senza e con pannello Acustideco®, non rivestito e rivestito.

La scelta del tessuto è di cruciale importanza: un tessuto con pessime caratteristiche acustiche potrebbe vanificare l’effetto del pannello fonoassorbente trasformandolo, nei casi più critici, in uno specchio acustico; d’altro canto, l’alto costo delle tele acustiche obbliga, per motivi prettamente economici, ad andare alla ricerca di tessuti più economici.

Analisi Utilizzo Tela di Cotone

Senza appendere il pannello fonoassorbente nella stanza è stato rilevato il seguente tempo di riverbero:

	Stanza Vuota	
Freq	T60 (Prima prova)	T60 (Seconda Prova)
125	1,74	1,83
160	-,--	-,--
200	2,17	1,32
250	1,96	1,12
315	1,13	1,47
400	1,14	1,29
500	1,12	0,87
630	0,96	1,21
800	1,15	1,38
1000	0,96	1,37
1250	0,7	0,88
1600	0,92	0,78
2000	0,76	0,69
2500	0,88	1,1
3150	0,63	0,67
4000	0,72	0,63
5000	0,67	0,61
6300	0,61	0,55
8000	0,51	0,52
10000	0,43	0,4

Tabella 8.37. Tempo di riverbero stanza di test

Non per tutte le frequenze è stato possibile rilevare il tempo di riverbero.

Appendendo il pannello senza rivestirlo si riscontra il risultato seguente:

	Stanza con Acustideco	
Freq	T60 (Prima prova)	T60 (Seconda Prova)
125	1,38	1,37
160	-,--	2,16
200	1,17	1,31
250	1,57	1,65
315	0,99	0,96
400	0,99	0,91
500	0,87	0,9
630	0,85	0,98
800	1,1	1,28
1000	0,87	1,07
1250	0,66	0,69
1600	0,83	0,01
2000	0,72	0,72
2500	1,08	1,11
3150	0,91	0,64
4000	0,72	0,67
5000	0,54	0,01
6300	0,58	0,44
8000	0,5	0,46
10000	-,--	-,--

Tabella 8.38. Tempi di riverbero stanza di test con pannello Acustideco® non rivestito

Da trascurare, poiché ovviamente errati, i tempi di riverbero rilevati nella seconda prova per le frequenze 1600 Hz e 5000 Hz.

Appendendo il pannello rivestito con un tessuto 100% Cotone, si ottiene:

	Acustideco con Tela 100% Cotone	
Freq	T60 (Prima prova)	T60 (Seconda Prova)
125	2,26	2,55
160	1,42	-,--
200	1,42	2,15
250	1,22	1,28
315	1,23	1,22
400	0,86	0,98
500	0,69	1,03
630	0,94	1,46
800	1,04	1,61
1000	0,72	0,72
1250	0,74	0,92
1600	0,76	1,09
2000	0,62	0,84
2500	0,74	0,97
3150	0,62	0,87
4000	0,57	0,91
5000	0,54	0,75
6300	0,5	0,55
8000	0,49	0,48
10000	0,35	0,43

Tabella 8.39. Tempi di riverbero stanza di test con pannello Acustideco® rivestito con tela 100% cotone

Analisi dei dati

Concluse le rilevazioni si sono ottenuti i tempi di riverbero medi:

	Stanza Vuota	Stanza con Acustideco	Acustideco con Tela 100% Cotone
T60medio	0,996052632	0,91	0,988205128

Come si può notare, l'utilizzo del cotone come materiale di rivestimento è da sconsigliare, in quanto vanifica l'effetto di Acustideco®.

Analisi Utilizzo Tela di Poliestere

Dato che nel frattempo la stanza dove precedentemente erano state eseguite le prove era stata modificata, è stata inizialmente rifatta la misurazione del tempo di riverbero del locale:

	Stanza Vuota		
Freq	T60 (Prima prova)	T60 (Seconda Prova)	T60 (Terza Prova)
125	1,59	1,63	1,66
160	1,16	1,6	1,26
200	1,62	1,74	1,42
250	1,56	1,23	1,48
315	1,17	1,04	1,25
400	1,4	1,38	1,35
500	1,02	1,12	1,29
630	0,98	1,01	0,99
800	0,02	0,93	0,02
1000	0,92	0,95	0,95
1250	0,89	0,98	0,89
1600	0,71	0,97	0,01
2000	0,83	0,95	0,84
2500	0,74	0,76	0,75
3150	0,79	0,73	0,8
4000	0,67	0,66	0,01
5000	0,64	0,64	0,01
6300	0,67	0,58	0,67
8000	0,58	0,56	0,54
10000	0,5	0,5	0,49

Tabella 8.40. Tempi di riverbero stanza di test

Per una corretta analisi, è bene trascurare i valori dei tempi di riverbero della terza misurazione per le frequenze 800 Hz, 1600 Hz, 4000 Hz e 5000 Hz.

A questo punto è stata rifatta la misurazione con la presenza del pannello Acustideco® nella stanza:

	Stanza con Acustideco		
Freq	T60 (Prima prova)	T60 (Seconda Prova)	T60 (Terza Prova)
125	1,53	1,61	1,59
160	1,17	1,19	1,16
200	1,3	1,33	1,58
250	1,28	1,3	1,41
315	1,03	1,09	1,16
400	0,03	0,9	0,97
500	0,92	0,96	0,89
630	0,78	0,85	0,91
800	0,96	1,07	0,83
1000	0,8	0,74	0,81
1250	0,72	0,71	0,72
1600	0,01	0,71	0,72
2000	0,71	0,68	0,58
2500	0,76	0,59	0,63
3150	0,63	0,63	0,58
4000	0,56	0,57	0,59
5000	0,6	0,58	0,53
6300	0,52	0,57	0,56
8000	0,5	0,52	0,5
10000	0,44	0,45	0,49

Tabella 8.41.Tempi di riverbero stanza di test con pannello Acustideco® non rivestito

Anche in questo caso è bene trascurare il risultato ottenuto nella prima prova per la frequenza 1600 Hz.

Infine è stata effettuata la rilevazione del tempo di riverbero con la presenza nella stanza del pannello fonoassorbente rivestito di poliestere.

	Acustideco con Tela 100% Poliestere		
Freq	T60 (Prima prova)	T60 (Seconda Prova)	T60 (Terza Prova)
125	0,72	1,85	0,95
160	1,11	0,95	0,98
200	1,23	1,25	0,93
250	1,13	1,22	1,17
315	1,01	1,01	0,98
400	0,92	0,9	0,85
500	1	1,01	0,85
630	0,88	0,98	0,86
800	0,76	0,76	0,91
1000	0,72	0,81	0,82
1250	0,66	0,76	0,71
1600	0,01	0,71	0,65
2000	0,66	0,61	0,67
2500	0,69	0,56	0,63
3150	0,59	0,57	0,6
4000	0,58	0,58	0,54
5000	0,56	0,52	0,54
6300	0,52	0,53	0,51
8000	0,48	0,5	0,49
10000	0,45	0,45	0,42

Tabella 8.42. Tempi di riverbero stanza di test con pannello Acustideco® rivestito con tela 100% poliestere

Il tessuto utilizzato è ovviamente trattato in modo tale da essere ignifugo.

Analisi dei dati

Conclusi i rilievi, sono stati calcolati i tempi di riverbero medi:

	Stanza Vuota	Stanza con Acustideco	Acustideco con Tela 100% Poliestere
T60medio	0.91	0.82	0.77

Come si può notare, il poliestere non solo non altera le prestazioni del pannello fonoassorbente, ma lo migliora.

Conclusioni

Dall’analisi dei risultati risulta chiaro come il tessuto in poliestere sia nettamente migliore rispetto a quello in cotone, quindi da preferire nonostante il costo maggiore.

L’aumento delle prestazioni del pannello è dato dal fatto che tela e pannello fonoassorbente sono costituiti da materiali molto simili: fibra di poliestere il primo, poliestere il secondo. In pratica è come se fosse stato leggermente aumentato lo spessore di Acustideco®, migliorandone di conseguenza la performance.

Analisi della distanza fra muro e pannello

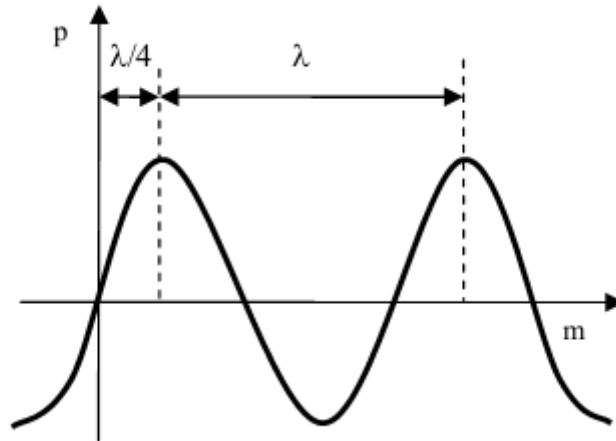
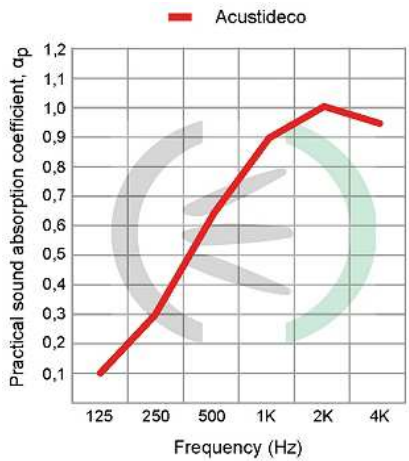
Prima di passare alla costruzione del pannello, si deve decidere a quale distanza dal muro posizionarlo. Come detto in precedenza, si tende a posizionarlo ad una distanza $d = \frac{\lambda}{4}$ dal muro, con λ fronte d'onda corrispondente alla frequenza massima che s'intende attenuare maggiormente.

Nel caso del pannello Acustideco®, $f(\alpha=\alpha_{max})$=2k Hz.

Freq (Hz)	125	250	500	1K	2K	4K
α	0,1	0,3	0,6	0,9	1	0,95

Figura 8.100.Grafico e tabella dei coefficienti assorbimento di Acustideco® in funzione della frequenza

Utilizzando la nota relazione

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

Con c=343 m/s velocità di propagazione del suono, è possibile stimare la distanza alla quale appendere il pannello.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343}{2000} = 0.1715\, m$$

Per cui si dovrà posizionare il pannello ad una distanza dal muro $d = \frac{\lambda}{4} = 4.2875\ cm$.

Per facilità di costruzione verrà scelta una distanza d=5cm, il che, utilizzando le formule, sposterà la frequenza per la quale l’assorbimento è massimo a:

$$f(\alpha = \alpha_{max}) = 1715\ Hz$$

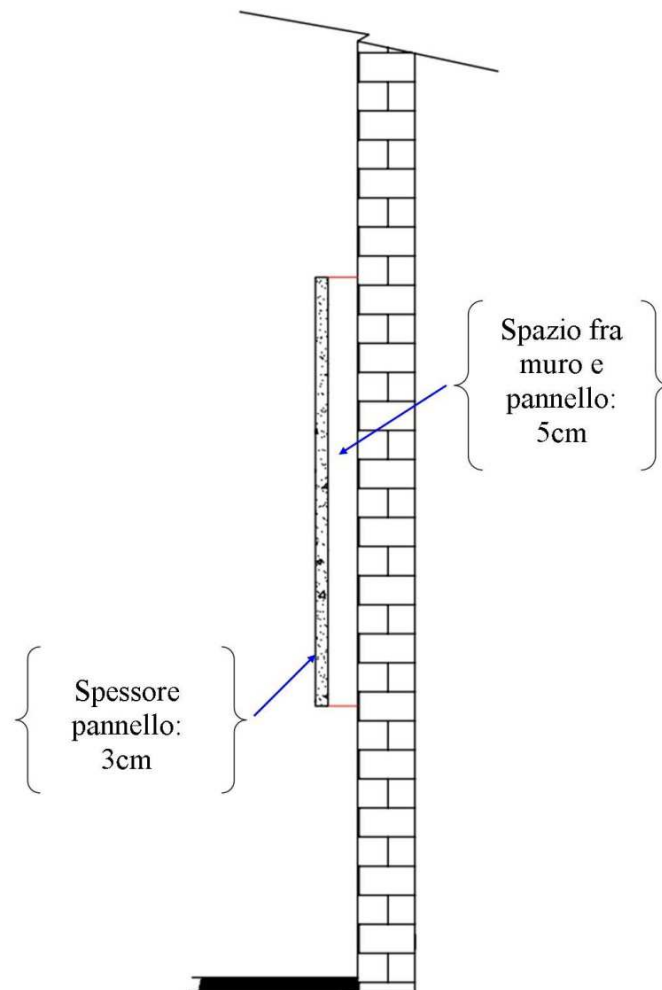



Figura 8.101. Esempio d'installazione di un pannello Acustideco® su di una parete

Installazione pannelli acustici Acustideco®

Successivamente sono stati fatti sopraluoghi per decidere il colore della tela da utilizzare e mostrare al cliente un possibile prototipo di pannello fonoassorbente.

Figura 8.102. Prototipo di un pannello fonoassorbente costruito utilizzando Acustideco®

Per motivi di carattere economico, e dato che con la sola installazione della pellicola di Microsorber® è stato raggiunto un risultato acustico ritenuto soddisfacente dal cliente stesso, si è deciso di non proseguire con l'installazione dei pannelli.

Capitolo 9

Sviluppo Tool per l’analisi acustica tramite MATLAB®

Analisi e schema a blocchi

Per facilitare i calcoli nell’analisi acustica, si è scelto di utilizzare MATLAB che permette in maniera semplice di importare ed esportare file in formato .xls, e può quindi essere usato in combinazione con Excel.

Tramite MATLAB è stato possibile sviluppare un semplice tool in grado di restituire, una volta concluse le rilevazioni preliminari, tutti gli elementi matematici descrittivi delle caratteristiche acustiche dell’ambiente.

Il programma è suddiviso in due blocchi: il primo restituisce tutte le caratteristiche acustiche della stanza, il secondo da indicazione sulla quantità di materiale fonoassorbente che si necessita installare per ottenere i risultati previsti.

Blocco 1: analisi acustica dell'ambiente

In questo primo blocco (Figura 9.1) si analizzano tutte le caratteristiche acustiche dell'ambiente in esame; date le quote del locale, i rilievi relativi a tempo di riverbero e pressione sonora, si ottengono i coefficienti di assorbimento e la costante ambientale.

In seguito all'osservazione dei risultati, una volta deciso di quanto si voglia ridurre la pressione sonora, si ricavano coefficienti di assorbimento, tempo di riverbero e costante d'ambiente che si intende ottenere dopo l'intervento di fonoassorbimento.

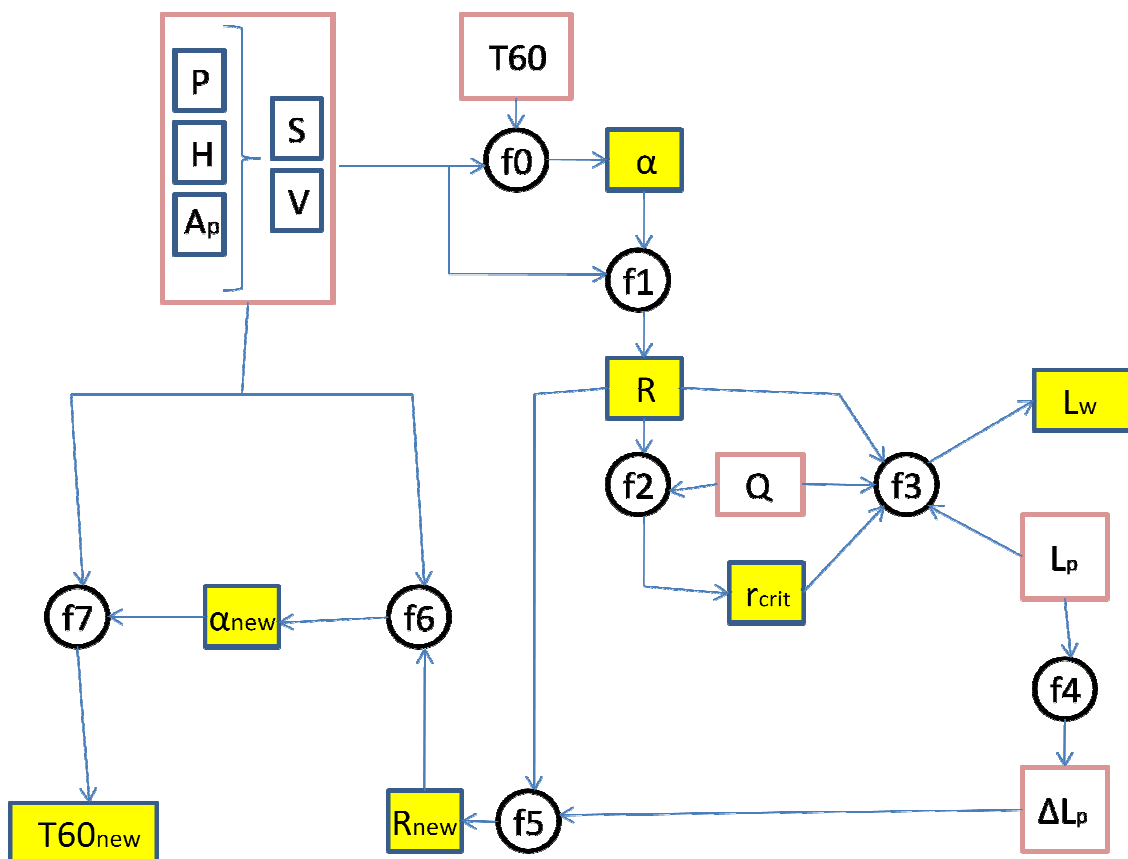



Figura 9.103. Schema a blocchi prima parte del tool

Dai rilievi geometrici si ricavano perimetro(P), altezza media del locale(H), area del perimetro(A_p), e di conseguenza superficie totale(S) e volume(V); dalle rilevazioni tramite fonometro si ottengono invece tempo di riverbero(T60) e livello di pressione sonora(L_p).

F0: Calcolo coefficienti di assorbimento (Alpha.m)

Dati S, V, T60, la funzione restituisce i coefficienti d'assorbimento α.

```
function [alpha]=alpha(T60,V,S)

k=0.161;
l=length(T60);

for j=1:l
    if((T60(j)==NaN)||(T60(j)==Inf))
        T60(j)=0;
    end
end

for i=1:l
    alpha(i)=(k/T60(i))*(V/S);
end

end
```

La formula utilizzata per il calcolo dei coefficienti di assorbimento è la già citata formula di sabine $\alpha = 0.161\frac{V}{T60S}$.

F1: Calcolo della costante d'ambiente (R.m)

Dati la S ed α, utilizzando la formula $R = \frac{S\bar{\alpha}}{1-\bar{\alpha}}$, si ricava la costante d'ambiente.

```
function R=R(alpha,S)
l=length(alpha);

for i=1:l
    R(i)=(alpha(i)/(1-alpha(i)))*S;
end
end
```

F2: Calcolo della distanza critica (rcrit.m)

Per calcolare la distanza critica $r_{crit} = \sqrt{\frac{RQ}{16\pi}}$, oltre che della costante d'ambiente R si necessita d'impostare l'indice di direttività Q; si deve quindi fare un analisi della sorgente per determinare il valore più consono (Figura 9.2).

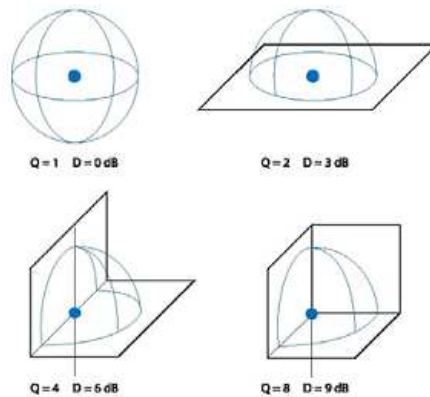



Figura 9.104. Indici di direttività; nel caso in esame è stato scelto Q=2

Il calcolo della distanza critica viene fatto scegliendo il valore di R maggiore tra quelli calcolati.

```
function rcrit=rcrit(R,Q)

Rmax=max(R);

rcrit=ceil(sqrt((Rmax*Q)/(16*pi)))+1;

end
```

F3: Calcolo del livello di Potenza Sonora della sorgente (Lw.m)

Dati L_p, R, Q ed r_{crit}, si ricava il livello di potenza sonora $L_w = L_p - 10Log\left(\frac{Q}{4\pi {r_{crit}}^2} + \frac{4}{R}\right)$.

```
function Lw=Lw(Lp,R,Q,rcrit)
l=length(Lp);
j=length(R);

if l<j
    R=R(1:l);
else if j<l
        Lp=Lp(1:j);
    end
end

m=min(l,j);

for i=1:m
    Lw(i)=Lp(i)-10*log10((Q/(4*pi*(rcrit)^2))+(4/R(i)));
end

end
```

F4: Stima della riduzione del livello di pressione sonora in dB

Dall'osservazione di tutti i dati ottenuti, in questo punto del programma si richiede di inserire la diminuzione del livello di pressione sonora ΔL_p che si desidera ottenere.

F5:Calcolo della nuova costante d'ambiente (Rnew.m)

Dati R e ΔL_p, si ricava $R_{new} = R10^{\frac{\Delta L_p}{10}}$.

```
function Rnew=Rnew(R,deltaLp)
l=length(R);

for i=1:l
    Rnew(i)=R(i)*10^(deltaLp/10);
end

end
```

F6: Calcolo dei nuovi coefficienti di assorbimento (Alphanew.m)

Dati R_{new} e S, si ricava $\alpha_{new} = \frac{R_{new}}{R_{new}+S}$.

```
function alphanew=alphanew(Rnew,S)
l=length(Rnew);

for i=1:l
    alphanew(i)=Rnew(i)/(Rnew(i)+S);
end

end
```

F7: Calcolo dei nuovi tempi di riverbero (T60new.m)

Dati V, S ed α_{new}, si ricava $T60_{new} = 0.161\frac{V}{\alpha_{new}S}$.

```
function T60new=T60new(alphanew,V,S)
k=0.161;
l=length(alphanew);

for i=1:l
    T60new(i)=k*(V/(alphanew(i)*S));
end

end
```

Blocco 2: analisi area da trattare

In questo secondo blocco (Figura 9.3), una volta conosciuti i risultati che si desiderano ottenere, viene calcolato, previa scelta del materiale fonoassorbente che verrà utilizzato, la quantità di superficie da trattare.

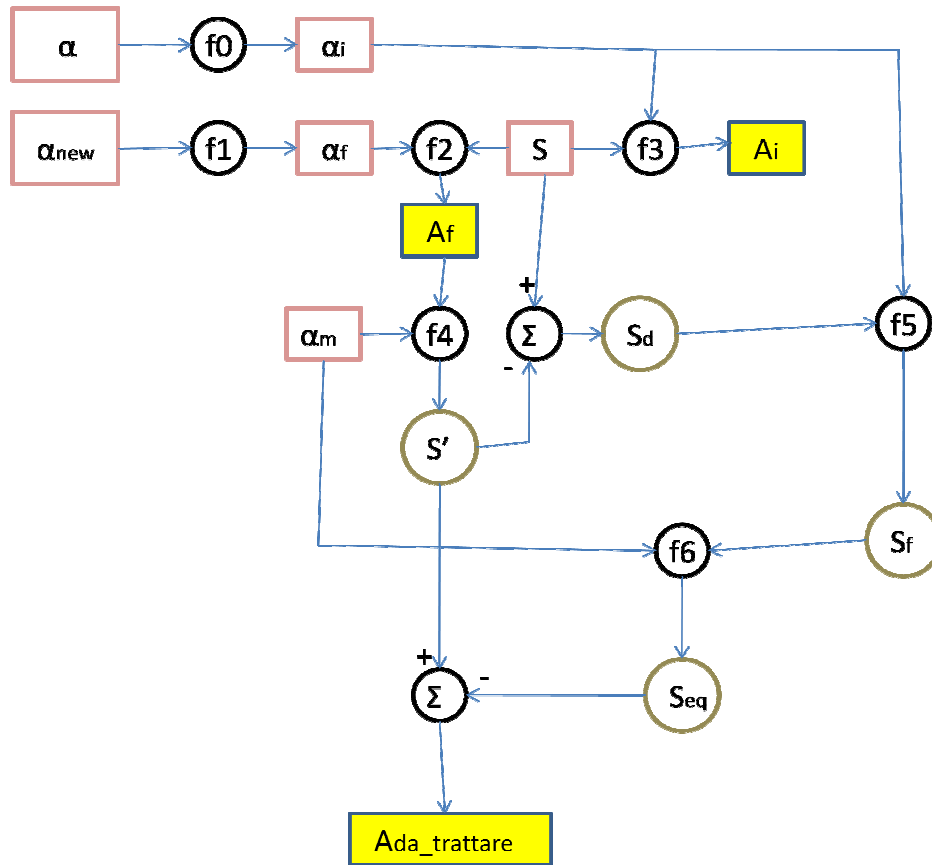



Figura 9.105.Schema a blocchi seconda parte del tool

F0: Calcolo del coefficiente di assorbimento medio

La funzione calcola, dati coefficienti di assorbimento α dell'ambiente, il coefficiente di assorbimento medio α_i .

F1 : Calcolo del coefficiente di assorbimento medio dopo l'intervento

La funzione calcola, dati i coefficienti di assorbimento α_{new}, il coefficiente di assorbimento medio α_f.

$$\alpha_f = media(\alpha_{new})$$

F2: Calcolo area efficace dopo l'intervento

Dati α_f e S, l'area efficace si calcola tramite la formula:

$$A_f = \alpha_f S$$

F3: Calcolo area efficace prima dell'intervento

La formula è identica a quella precedentemente utilizzata:

$$A_i = \alpha_i S$$

F4: Calcolo superficie equivalente

La funzione calcola la superficie equivalente nel caso il coefficiente di assorbimento medio fosse pari a quello del materiale fonoassorbente α_m.

$$S' = \frac{A_f}{\alpha_m}$$

F5: Calcolo area efficace residua

La funzione calcola semplicemente:

$$S_f = \alpha_i S_d = \alpha_i (S - S')$$

F6: Calcolo Superficie di comparazione

La funzione calcola l'equivalenza fra l'area della superficie con $\alpha=\alpha_i$ e quella con $\alpha=\alpha_m$.

$$S_{eq} = \frac{S_f}{\alpha_m}$$

Programma di Analisi Ambientale

Una volta definite tutte le funzioni, è stato possibile creare una procedura che le raggruppasse tutte.
Sono state sviluppate due versioni: una da riga di comando ed una visuale. In entrambi i casi, bisogna in primo luogo caricare il file con le frequenze analizzate, ed infine è possibile salvare in formato .xlsx i risultati ottenuti.

I controlli sulle varie procedure sono minimi, dato che il tool è stato utilizzato unicamente da colui che l’ha creato.

Versione da riga di comando

Di seguito il codice commentato e diviso nei due blocchi sopra analizzati:

```
close all;
clear all;
clc;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%
%Il Programma vuole essere uno strumento utile per l'analisi degli
elementi
%che contraddistinguono una stanza dal punto di vista sonoro, i
%miglioramenti da fare per migliorarli, ed infine la quantità, in
metri
%quadri, di materiale fonoassorbente necessario per arrivare a tali
%risultati.
%Il programma è diviso in due blocchi: nel primo si analizza
l'ambiente in
%tutti i suoi aspetti e si stimano le migliorie da fare, nel secondo
si
%stima la quantità di materiale da utilizzare per arrivare ai
risultati
%ottenuti nel primo blocco.
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%



%Per prima cosa si inseriscono le frequenze sulle quali si andrà ad
operare
%l'analisi caricando il file relativo

j=input('Premere invio per caricare le frequenze','s');
[fname, pname]=uigetfile('*.*', 'Pick a .mat File');
F=importdata(fname);
j=input('Frequenze Caricate.Premere invio per procedere','s');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%


%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
%Blocco 1:date le caratteristiche geometriche della stanza, il tempo
di
%riverbero, il livello di pressione sonora, verranno calcolati tutti
gli
```

```
%elementi per far si di diminuire lo stesso e contemporaneamente il
T60
%aumentando i coefficioenti di assorbimento
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%Inseririre i dati geometrici della stanza
i='i';

while i~='s'
    P=input('Inserire perimetro (m): ');
    H=input('Inserire altezza (m): ');
    Ap=input('Inserire area del perimetro (m^2): ');

    display(['perimetro ',num2str(P),' m, Altezza ',num2str(H),' m,
area del perimetro ', num2str(Ap),' m^2.']);
    i=input('Confermi? Digita s per confermare, n per reinserire i
dati: ','s');
end

S=P*H+2*Ap;
V=Ap*H;
display(['Area della Superficie ',num2str(S),' m^2, Volume
',num2str(V),' m^3.']);
i=input('Premere invio per proseguire.','s');

%Carico i dati relativi a Tempo di riverbero e Pressione Sonora
j=input('Premere invio per caricare il file relativo al tempo di
riverbero: ', 's');
[fname, pname]=uigetfile('*.*', 'Pick a File');
T60=importdata(fname);
display(['File Caricato']);
title('RT60'),plot(log10(F),T60);

j=input('Premere invio per caricare il file relativo alla pressione
sonora: ', 's');
[fname, pname]=uigetfile('*.*', 'Pick a File');
Lp=importdata(fname);
display(['File Caricato']);
figure(2);
title('Lp')
plot(log10(F),Lp);

i=input('Premere invio per proseguire e calcolare i coefficienti di
assorbimento','s');

Coeff=alpha(T60,V,S);
display(['Coefficienti di assorbimento calcolati']);
i=input('Premere invio per proseguire e calcolare la costante
ambientale','s');

%Calcolo costante d'ambiente
R=R(Coeff,S);
display(['Costante ambientale calcolata']);
i=input('Premere invio per proseguire e calcolare la distanza
critica','s');
```

```
%Calcolo distanza critica
m='m';
while m~='s'
    Q=input('Inserire coefficiente di direttività: ');
    m=input('Confermi? Digita s per confermare, n per reinserire i 
dati: ','s');
end
r=rcrit(R,Q);
display(['Distanza critica calcolata: ', num2str(r),'m.']);
i=input('Premere invio per proseguire e calcolare il livello di 
potenza sonora della sorgente Lw','s');

%Calcolo Lw
LW=Lw(Lp,R,Q,r);
display(['Livello di potenza sonora della sorgente calcolata']);
i=input('Premere invio per proseguire e determinare la riduzione del 
livello di pressione sonora desiderata','s');

%Calcolo deltaLp
w='w';
while w~='s'
    deltaLp=input('Inserire la riduzione da applicare al livello di 
pressione sonora (dB): ');
    w=input('Confermi? Digita s per confermare, n per reinserire i 
dati: ','s');
end

%[Facoltativo]
%Calcolo Nuovo Lp che si dovrà rilevare

for i=1:length(Lp)
    Lp_new(i)=Lp(i)-deltaLp;
end

display(['Nuovo livello di pressione sonora calcolata']);
figure(3);
title('Confronto Lp-Lp_new')
plot(log10(F),Lp,log10(F),Lp_new);
legend('Lp','Lp_new');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%

i=input('Premere invio per proseguire e determinare la nuova costante 
ambientale','s');

%Calcolo nuova costante d'ambiente
Rnew=Rnew(R,deltaLp);
display(['Nuovo costante ambientale calcolata']);
i=input('Premere invio per proseguire e determinare i nuovi 
coefficienti di assorbimento','s');

%Calcolo dei nuovi coefficienti di assorbimento
Coeff_new=alphanew(Rnew,S);
display(['Nuovi coefficienti di assorbimento calcolati']);
i=input('Premere invio per proseguire e determinare i nuovi tempi di 
riverbero','s');
```

```
figure(5);
title('Coefficienti di Assorbimento')
plot(log10(F),Coeff,log10(F),Coeff_new);
legend('Alpha','Alpha_new');

%Calcolo nuovi tempi di riverbero
T60new=T60new(Coeff_new,V,S);
display(['Nuovi tempi di riverbero calcolati calcolati']);
figure(6);
title('Tempi di Riverbero')
plot(log10(F),T60,log10(F),T60new);
legend('RT60','RT60_new');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Creo Tebelle utilizzabili poi in altri programmi per elaborazioni e
%confronti
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

i=input('Premere invio per salvare i risultati','s');
close all;

Tempo_di_Riverbero=[F;T60];
Nuovo_Tempo_Riverbero=[F;T60new];

Coefficienti_Assorbimento=[F;Coeff];
Nuovi_Coefficienti_Assorbimento=[F;Coeff_new];

Costante_Ambiente=[F;R];
Nuova_Costante_Ambiente=[F;Rnew];

Pressione_Sonora=[F;Lp];
Nuova_Pressione_Sonora=[F;Lp_new];

Potenza_Sorgente=[F;LW];

save Tempo_di_Riverbero.mat Tempo_di_Riverbero;
save Nuovo_Tempo_Riverbero.mat Nuovo_Tempo_Riverbero;

save Coefficienti_Assorbimento.mat Coefficienti_Assorbimento;
save Nuovi_Coefficienti_Assorbimento.mat
Nuovi_Coefficienti_Assorbimento;

save Costante_Ambiente.mat Costante_Ambiente;
save Nuova_Costante_Ambiente.mat Nuova_Costante_Ambiente;

save Pressione_Sonora.mat Pressione_Sonora;
save Nuova_Pressione_Sonora.mat Nuova_Pressione_Sonora;

save Potenza_Sorgente.mat Potenza_Sorgente;

display(['Risultati Salvati']);
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
%Blocco 2: Dati i risultati del blocco precedente, analizzato il
%coefficiente di assorbimento  del materiale che verrà utilizzato, si
%calcolano i metri quadri da ricorpire
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%

%Inserisco il coefficiente di assorbimento del materiale
fonoassorbente
alpham=input('Inserire il coefficienti di assorbimento del materiale
fonoassorbente: ');

%Calcolo coefficiente medio di assorbimento dell'ambiente
alpha_i=0;
for i=1:length(Coeff)
    alpha_i=alpha_i+Coeff(i);
end
alpha_i=alpha_i/length(F);
display(['Coefficiente medio di assorbimento pre-trattamento:
',num2str(alpha_i)]);

%Calcolo coefficiente medio di assorbimento dopo il trattamento di
%fonoassorbimento
alpha_new=0;
for i=1:length(Coeff_new)
    alpha_new=alpha_new+Coeff_new(i);
end
alpha_new=alpha_new/length(F);
display(['Coefficiente medio di assorbimento pre-trattamento:
',num2str(alpha_new)]);

i=input('Premere il tasto "invio" per procedere al calcolo della
quantità di superficie da ricoprire tramite il materiale
fonoassorbente');

%Calcolo Aree Efficaci
Ai=alpha_i*S;
Af=alpha_new*S;

%Calcolo Superficie equivalente
Snew=Af/alpham;

%Calcolo differenza fra le superfici trovate
Sd=S-Snew;

%Calcolo Area efficace residua
Sf=alpha_i*Sd;

%Calcolo superficie equivalente tra quella con coefficiente alpha_i e
%quella con coefficiente alpham
Seq=Sf/alpham;
```

```
%Calcolo infine la superficie effettiva da trattare
S_da_trattare=Snew-Seq;
display(['Per ottenere i risultati desiderati bisognerà ricoprire la
superficie con ',num2str(S_da_trattare),' m^2 ']);
display(['di materiale fonoassorbente con coefficiente di assorbimento
di ',num2str(alpham),'.']);
```

Versione GUI

Utilizzando lo strumento GUIDE di MATLAB, è stato possibile, modificando leggermente il codice, creare una versione GUI del tool precedentemente progettato.

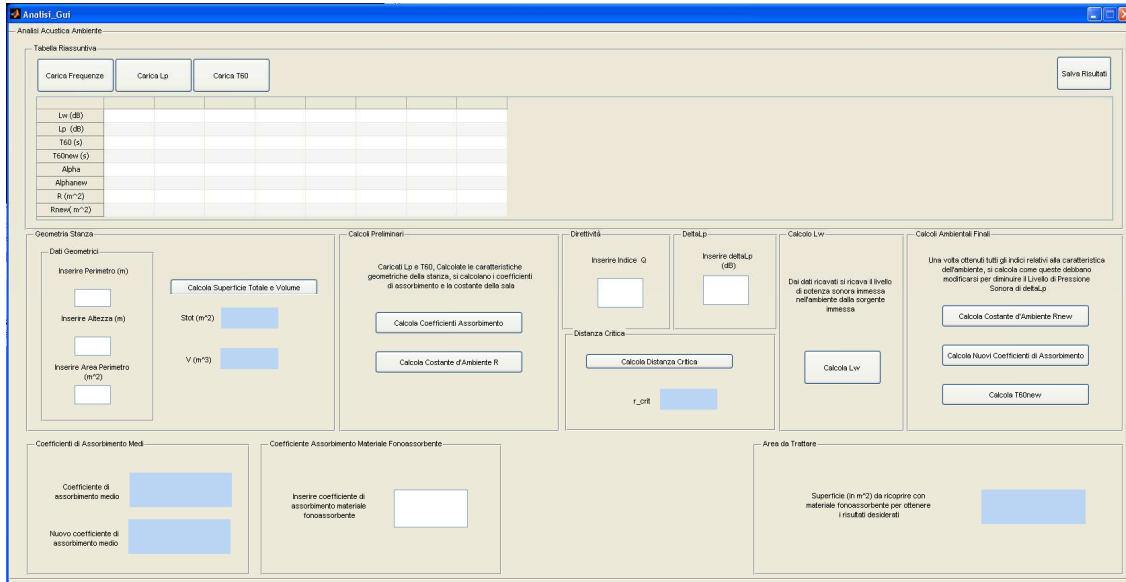



Figura 9.106. Schermata generale tool

Nella parte in alto (denominata ‘Tabella Riassuntiva’)si trovano i tasti per caricare il file con le frequenze analizzate, i file relativi alle misurazioni riguardanti il tempo di riverbero e il livello di pressione sonora, la tabella, che si riempie automaticamente con il procedere dei calcoli, che raggruppa tutti i risultati ottenuti, ed un tasto ‘Salva Risultati’ che permette di creare un file .xlsx della stessa.

Sotto la tabella si trova la zona relativa alle componenti geometriche della stanza: una volta inseriti perimetro, altezza ed area del perimetro (ricavabili dalle quote rilevate), è possibile calcolare superficie totale e volume totale premendo sull’apposito pulsante.

Figura 9.107. Zona relativa alle componenti geometriche della stanza

Una volta caricati tutti i dati e calcolati volume e superficie, è possibile calcolare coefficienti di assorbimento e costante d'ambiente premendo gli appositi pulsanti.

Figura 9.108. Sezione relativa al calcolo dei coefficienti di assorbimento e costante d'ambiente R

Fatto ciò, nell’area a fianco di quest’ultima, è possibile impostare l’indice di direttività Q , calcolare la distanza critica r_{crit} , impostare la quntità in dB di riduzione del livello di pressione sonora desiderato e ricavare il livello di potenza sonora L_w.

Figura 9.109. Sezione nella quale s'impostano indice Q, riduzione di pressione sonora desiderata e vengono calcolate distanza critica e livello di potenza sonora.

La scelta di ΔL_p è semplificata dal fatto che il programma genera automaticamente i grafici relativi ai livelli di pressione sonora.

Dopo quest’ultima operazione è possibile finalmente calcolare la costante d’ambiente, i coefficienti di assorbimento e il tempo di riverbero che si rileveranno nel caso si raggiunga la riduzione di pressione sonora voluta.

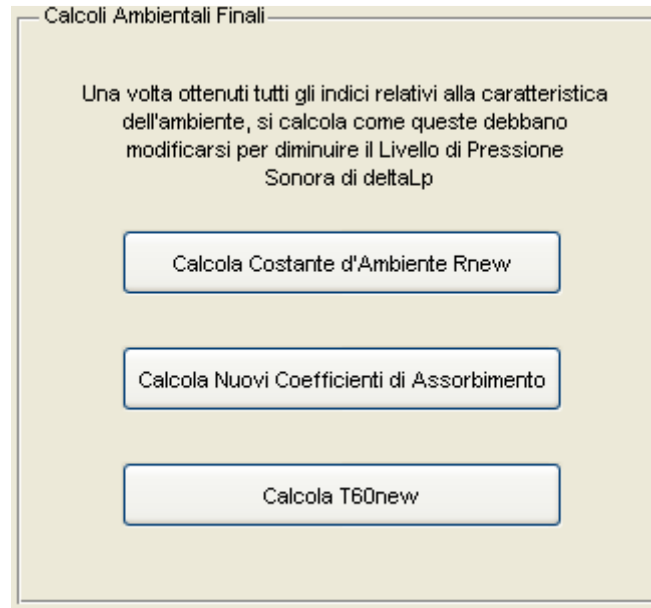



Figura 9.110. In questo blocco vengono calcolati costante d'ambiente, coefficienti d'assorbimento e tempi di riverbero che si desiderano ottenere.

Il programma calcola quindi in automatico il coefficiente di assorbimento medio prima e dopo l'intervento di fonoassorbimento.

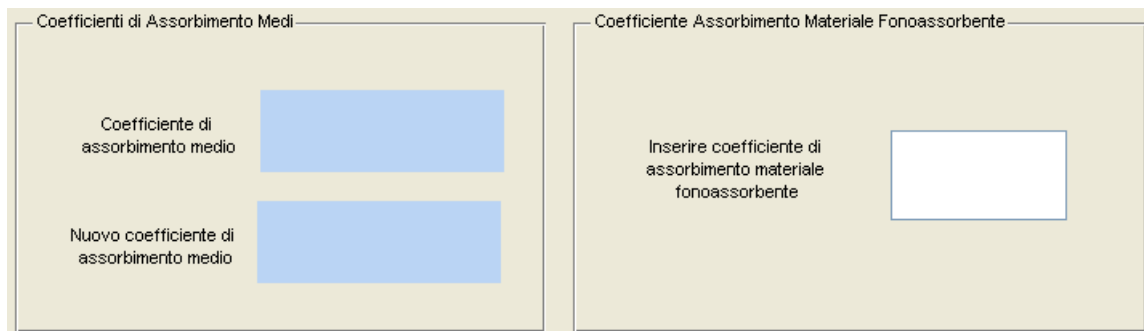



Figura 9.111. In questa sezione vengono visualizzati i valori medi di assorbimento prima e dopo l'intervento, e il coefficiente di assorbimento del materiale fonoassorbente che verrà utilizzato

L’ultima operazione è quella di inserire il coefficiente di assorbimento medio del materiale che verrà utilizzato, ed il programma restituirà la quantità, in metri quadri, di superficie che dovrà essere ricoperta per ottenere i risultati auspicati.

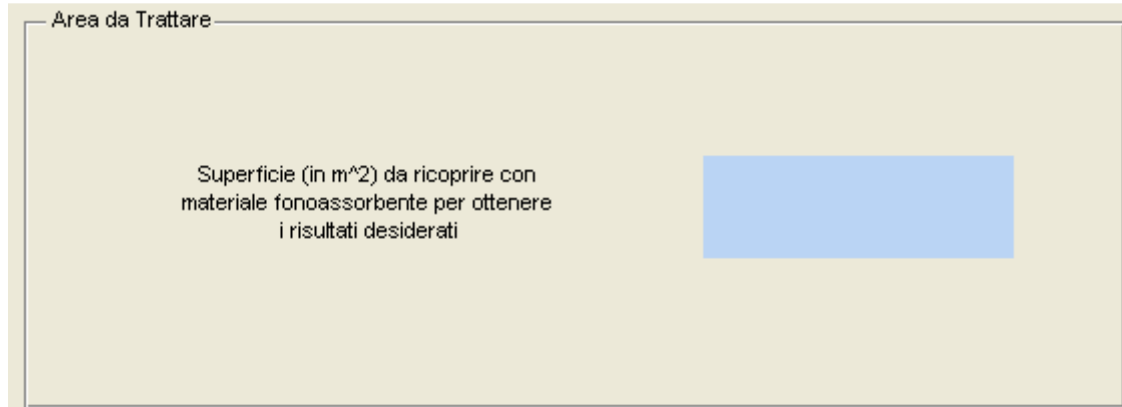



Figura 9.112. La sezione restituisce la quantità, in metri quadri, di superficie da trattare

Conclusioni

È stato possibile compilare sia la versione a riga di comando che quella GUI grazie al comando `deploytool`, che permette di aprire un menù in MATLAB nel quale inserire gli M-file che si desideri trasformare in un applicazione standalone.

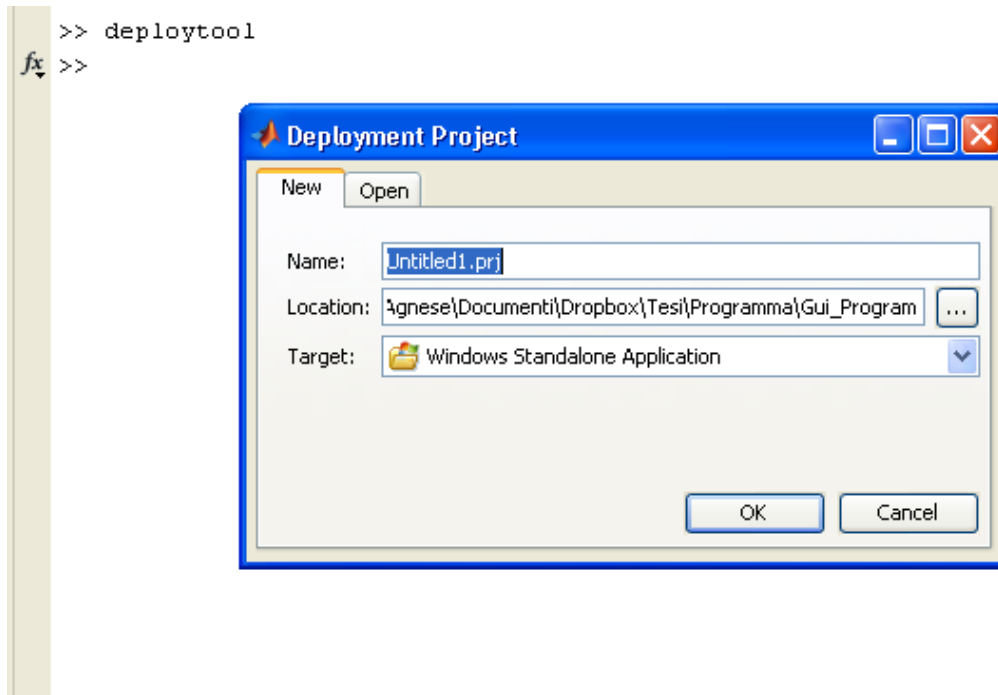



Figura 9.113. Strumenti in MATLAB per la compilazione degli M-files

Questo tool è stato utilizzato, oltre che per sapere i metri quadri da ricoprire per ottenere la diminuzione del livello di pressione sonora desiderato, anche in modo inverso: dati i metri quadri rivestiti di materiale fonoassorbente, stimare di quanto verrà ridotto il livello sonoro.

Capitolo 10

Simulazione dei risultati tramite CARA®

Il Software CARA® - Computer Aided Room Acoustic

CARA® è un software per la progettazione di impianti elettroacustici per ambienti interni. Attraverso tale programma è possibile disegnare la pianta del locale e determinarne le quote, scegliere l'arredamento e i materiali che compongono la stanza.

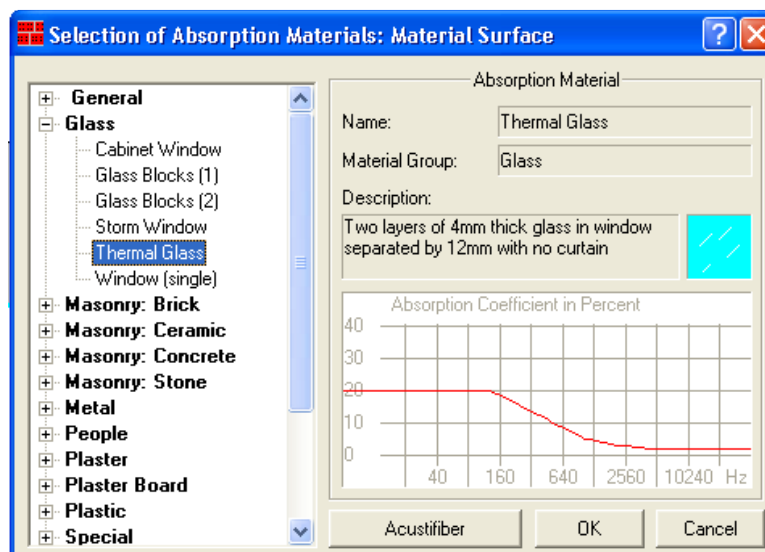



Figura 10.114. Schermata menù di selezione del materiale che compone un ambiente

Il software fornisce un folto numero di materiali, ciascuno con il grafico relativo alle proprietà di fono assorbimento (Figura 10.1); è inoltre possibile creare il proprio materiale impostando i valori dei coefficienti di assorbimento divisi per frequenza (Figura 10.2).

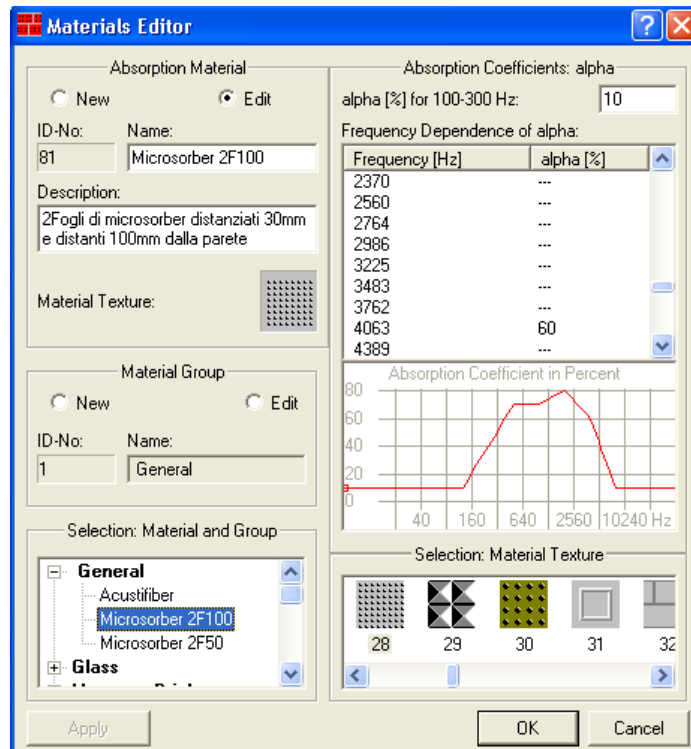



Figura 10.115. Menù editor dei materiali fonoassorbenti

Oltre a ciò, CARA® contiene un database di numerosi altoparlanti (Figura 10.3) e fornisce la possibilità di disegnare il proprio speaker (Figura 10.4).

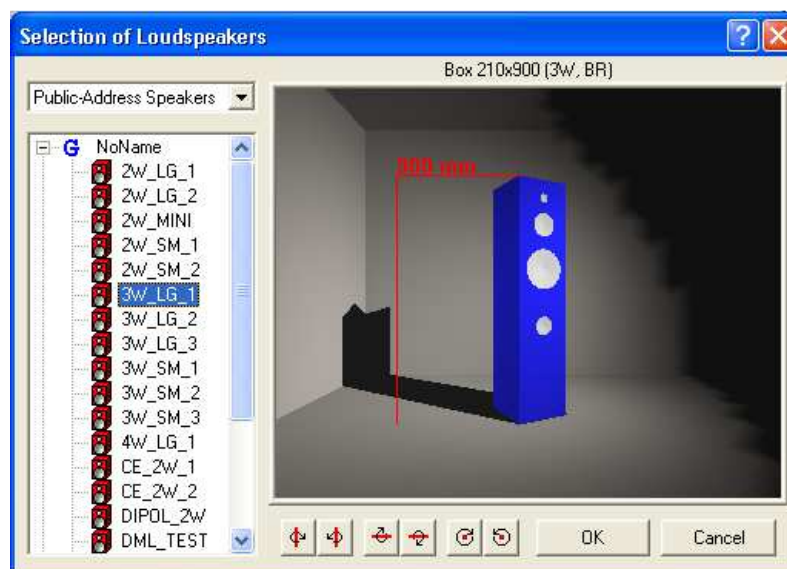



Figura 10.116. Menù selezione speaker

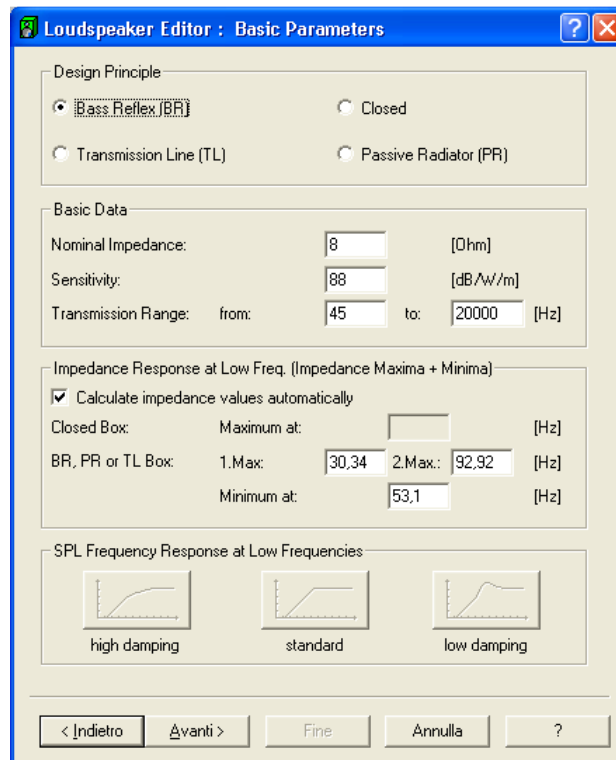



Figura 10.117. Menù editor degli speaker

Una volta impostati tutti i parametri, il programma permette di analizzare il tempo di riverbero e le proprietà fonoassorbenti dell'ambiente e, attraverso il tool CARACALC®, determinare il livello di pressione sonora, visualizzare il campo sonoro e migliorare il posizionamento degli speaker per ottimizzare i risultati.

Utilizzo di CARA® nel caso del ristorante Barracudino Easy&Chic

Nel caso specifico preso in esame, si è cercato di utilizzare il software in maniera differente: una volta impostate le caratteristiche dei materiali della stanza, le persone sono state simulate con degli altoparlanti sospesi a circa un metro dal pavimento. Fatto ciò, sono stati analizzati i tempi di riverbero e le proprietà fonoassorbenti del locale con e senza trattamento acustico.

Analisi Simulazione prima del trattamento acustico

Considerando come se fossero presenti 70 persone (quindi 70 altoparlanti), sono stati ottenuti i seguenti risultati:

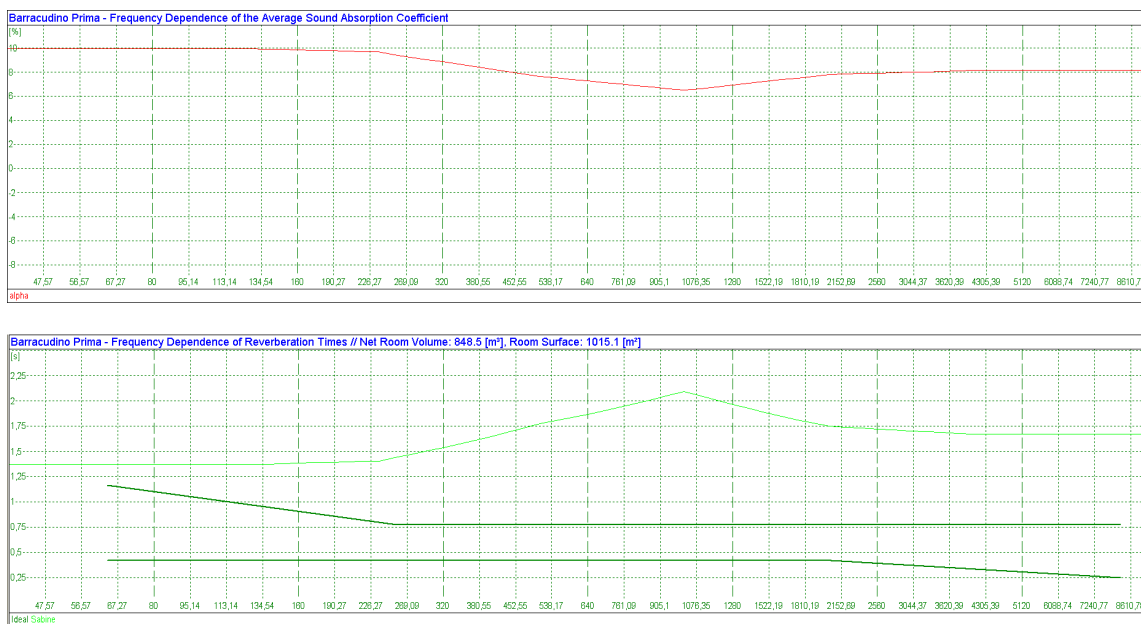



Figura 10.118. Grafici del coefficienti di assorbimento e del tempo di riverbero simulati pre trattamento

Notevoli sono le differenze con quanto rilevato inizialmente in loco: i grafici sono molto diversi fra loro, e la differenza fra i valori è molto marcata.

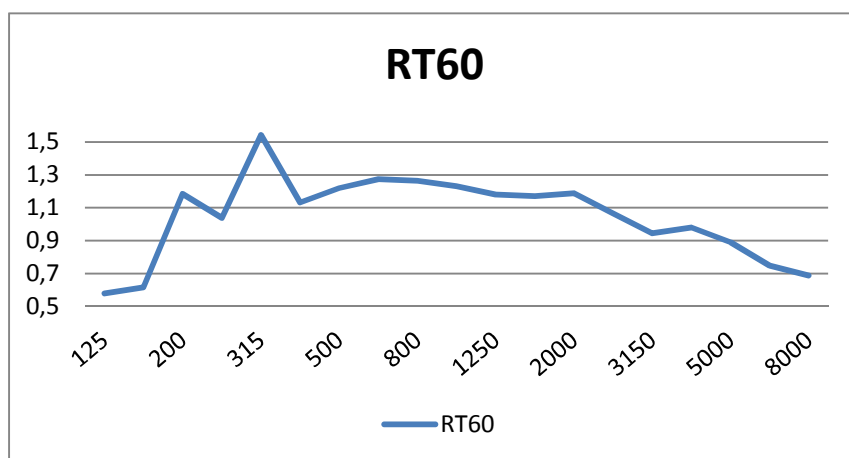



Figura 10.119. Grafico del tempo di riverbero misurato durante il rilevamento pre intervento

Analisi Simulazione dopo il trattamento acustico

Sempre considerando la presenza di 70 persone (70 altoparlanti), considerando di aver installato sia Microsorber® che pannelli acustici Acustideco®, si sono ottenuti i seguenti risultati:

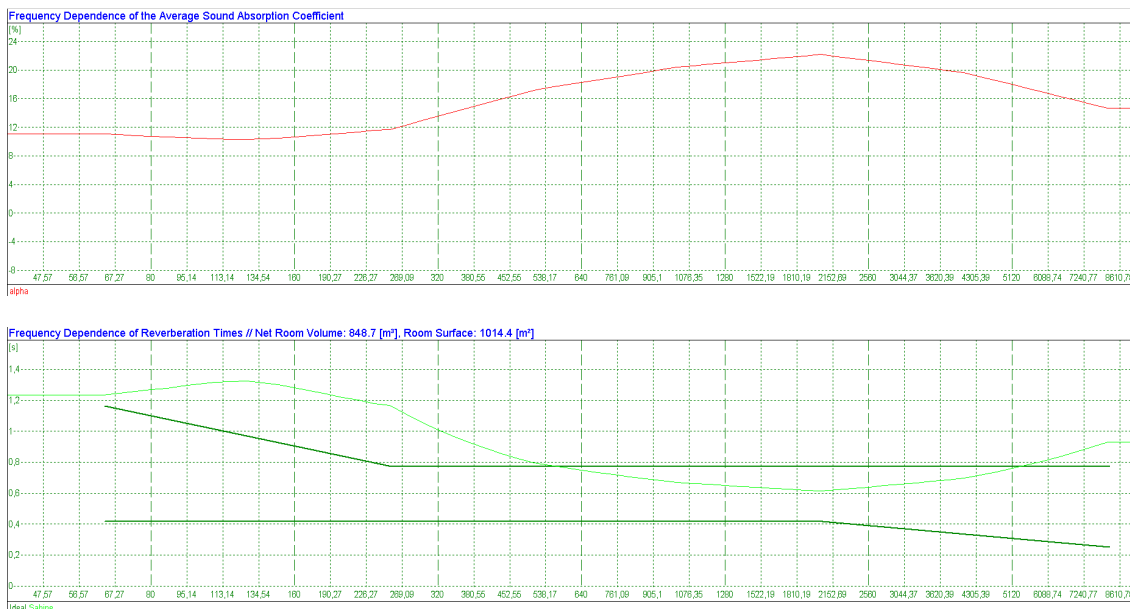



Figura 10.120.Grafici del coefficienti di assorbimento e del tempo di riverbero simulati dopo il trattamento

Anche in questo caso i risultati ottenuti sono molto differenti da quelli ottenuti dalla simulazione in MatLab, sia per quanto riguarda il grafico, che per quel che riguarda i valori numerici.

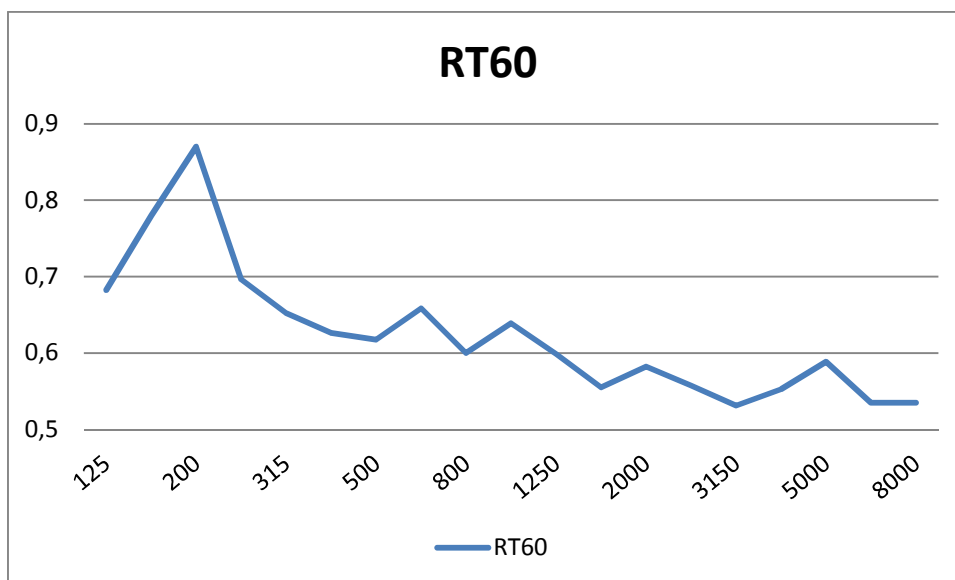



Figura 10.121. Grafico del tempo di riverbero misurato durante il rilevamento dopo la posa di Microsorber®

Conclusioni

Ciò che rende perplessi riguardo ai risultati ottenuti è la loro diversità rispetto ai dati dei rilevamenti e delle simulazioni in MatLab.
Nella simulazione a trattamento acustico concluso i risultati, come si nota dal seguente grafico, sono addirittura peggiori rispetto a quanto rilevato dopo la sola installazione dei fogli Microsorber®.

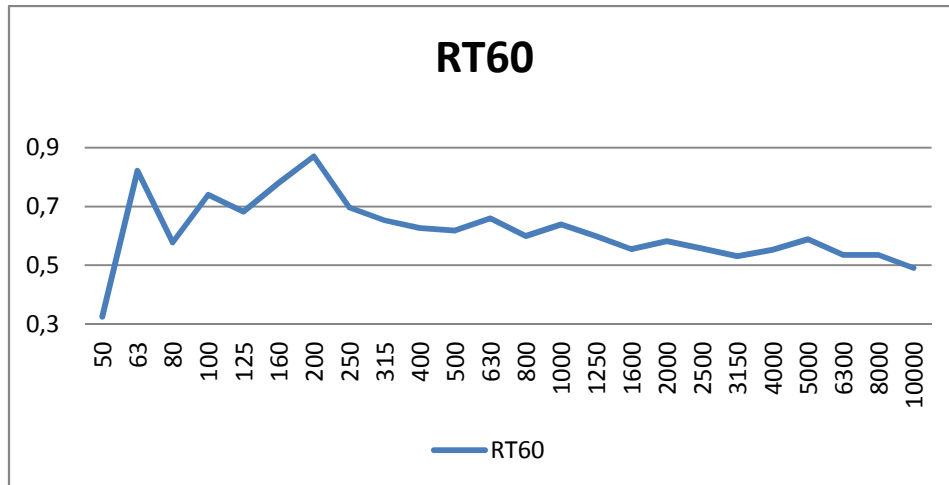



Figura 10.122. Tempo di riverbero post-trattamento in funzione della frequenza

Ciò è dovuto all'utilizzo improprio del software: è infatti errato utilizzare un programma per la progettazione di un impianto elettroacustico per l'analisi acustica di un ambiente. Simulando le persone come fossero degli speaker sospesi, ad esempio, viene trascurata la componente di assorbimento introdotta dal corpo umano e la variazione del livello sonoro dovuto all'effetto Lombard.

Capitolo 11

Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Nonostante i cambiamenti di progetto in corso d’opera, si è comunque raggiunto un risultato tale da permettere di effettuare un’analisi sul progetto di tesi inizialmente ipotizzato.

L’idea di partenza è stata quella di migliorare il confort acustico del ristorante Barracudino Easy&Chic installando del materiale fonoassorbente e sfruttando l’effetto Lombard, in modo tale da diminuire il livello di pressione sonora generato internamente al locale e, di conseguenza, quello trasmesso esternamente.

L’utilizzo di materiale fonoassorbente è stato fondamentale per ridurre la durata della coda del suono riflesso, in modo tale che quest’ultimo andasse a rinforzare il suono diretto senza mascherarlo; per fare ciò sono state utilizzate pellicole lucide e translucide di Microsorber® (si veda capitolo 5 per dettaglio sul materiale).

Come esaminato nel capitolo 3, per effetto Lombard s’intende quel fenomeno che mette in relazione lo sforzo di chi parla ed il rumore di fondo. In generale, infatti, un parlatore tende a regolare il volume del proprio parlato in relazione alla percezione del livello di pressione sonora dell’ambiente che lo circonda: più quest’ultimo sarà alto, più lo sforzo risulterà sostenuto.
E’ stato inoltre mostrato che un soggetto normoudente tende ad aumentare l’intensità della propria voce di 3/6dB per ogni incremento di 10dB del rumore mascherante il messaggio; dato che nei locali pubblici, quindi anche nel caso del Barracudino Easy&Chic, è il vociare stesso che incrementa il rumore ambientale, si nota subito come quest’ultimo e lo sforzo vocale siano fortemente legati fra loro.

Caratteristiche ambientali e risultati aspettati

A seguito dei rilevamenti effettuati, è stato possibile determinare le caratteristiche acustiche della stanza, ed in particolare:

- Tempo di riverbero medio di 1.02 sec.

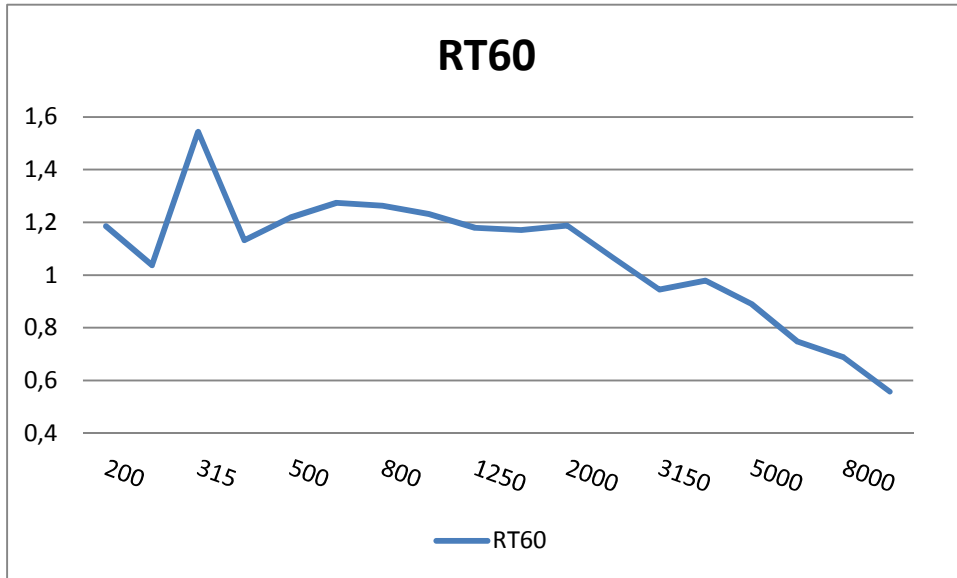



Figura 11.123. Tempo di riverbero del locale esaminato

- Coefficiente di assorbimento medio dell'ambiente α_m=0.15.

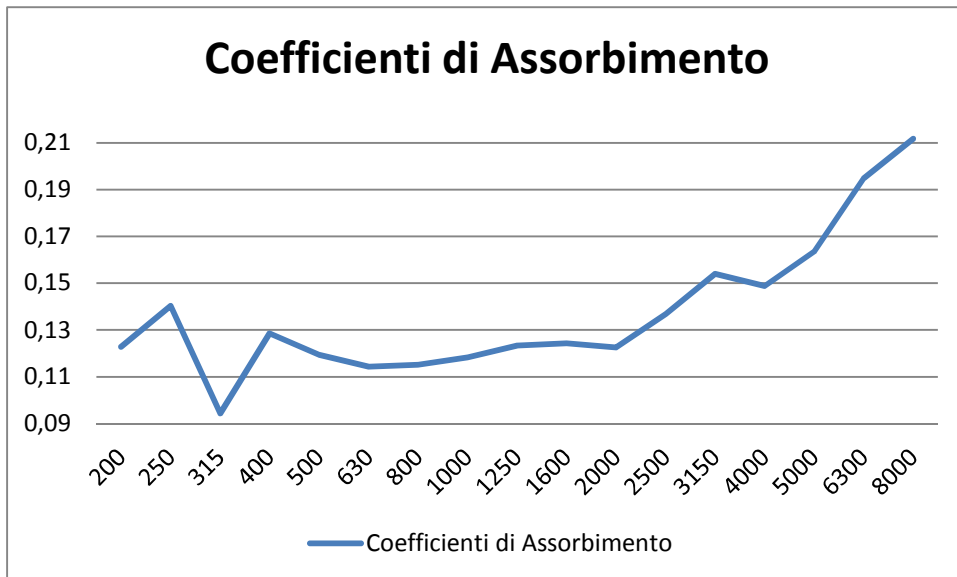



Figura 11.124. Coefficenti di assorbimento del locale esaminato

- Livello di pressione sonora equivalente non ponderato con locale in attività L_{Zeq}=85 dB.
- Livello di pressione sonora equivalente ponderato A con locale in attività L_{Aeq}=79 dB.

Si consideri la seguente tabella (Tabella 11.1), ricavata dalla tabella 3.7, capitolo 3; a seconda del numero di persone e dello sforzo vocale esercitato da ciascuna di esse, viene associato il livello sonoro generato all’interno del locale.

	SFORZO VOCALE (dBA) - Livello Sonoro Generato				
Numero di Persone	**Basso**	**Normale**	**Sostenuto**	**Forte**	**Urlato**
1	54	60	66	72	78
2	57	63	69	75	81
4	60	66	72	78	84
8	63	69	75	81	87
16	66	72	78	84	90
32	69	75	81	87	93
64	72	78	84	90	96
128	75	81	87	93	99

Tabella 11.43. Relazione tra il numero di persone, lo sforzo vocale e il livello di pressione sonora generato all'interno del locale.

Ipotizzando che i commensali fossero uniformemente distribuiti all’interno del ristorante,che in media durante le rilevazioni vi siano stati presenti in sala circa 60 persone, sapendo che il livello sonoro rilevato è stato di 79dBA, è possibile affermare, osservando la tabella, che lo sforzo vocale esercitato da un parlatore sia di tipo “sostenuto”.
A conferma di questo, si deve notare il fatto che tale tabella non contempla il fenomeno per cui, come detto in precedenza, una persona normoudente tenda ad incrementare il proprio sforzo vocale ogniqualvolta il rumore ambientale aumenti di 10dB; per questo motivo si è portati a dire che, partendo da uno sforzo “normale”, una volta presenti nel ristorante più di 8 persone, l’intensità della voce si sia spostata verso il livello “sostenuta”.

Un’ulteriore analisi deve essere fatta sul rumore di fondo che, come evidenziato nel capitolo 6, è costituito dalla musica ed equivale circa a L_n=L_{musica}=67dB; come rilevato, tale elemento influenza il livello totale di pressione sonora così poco da poter essere trascurato.

A conferma di ciò, si consideri il livello di pressione sonora rilevato L_{Zeq}=84dB; manipolando la formula

$$L_{Zeq} = 10Log\left(10^{\frac{L_S}{10}} + 10^{\frac{L_{musica}}{10}}\right)$$

con L_S livello sonoro del segnale generato dall'insieme delle persone presenti nel ristorante, si ricava che $L_S \cong 84$dB, per cui è possibile affermare che $L_{Zeq}=L_S$.

Questo dato conferma ancora una volta il fatto che per migliorare il confort acustico del ristorante Barracudino Easy&Chic si sia dovuto intervenire sul solo rumore generato dal vociare delle persone presenti in sala, cercando di far ridurre lo sforzo vocale da loro esercitato e di conseguenza diminuire il rumore ambientale da essi generato e percepito, migliorando quindi l'intelligibilità generale.

Primo passo è stato quindi quello di progettare un ambiente che, come detto in precedenza, avesse un riverbero tale da garantire al suono diretto di non essere mascherato da quello riverberato.

Si è quindi inizialmente valutato di diminuire il livello di pressione sonora di 5 dB trattando circa 210m^2 di superficie, con conseguente riduzione del tempo di riverbero a 0.42 sec. ed aumento del coefficiente di assorbimento medio α_m=0.36.

I grafici seguenti (Figura 11.13) mostrano i miglioramenti previsti dopo l'intervento progettato.

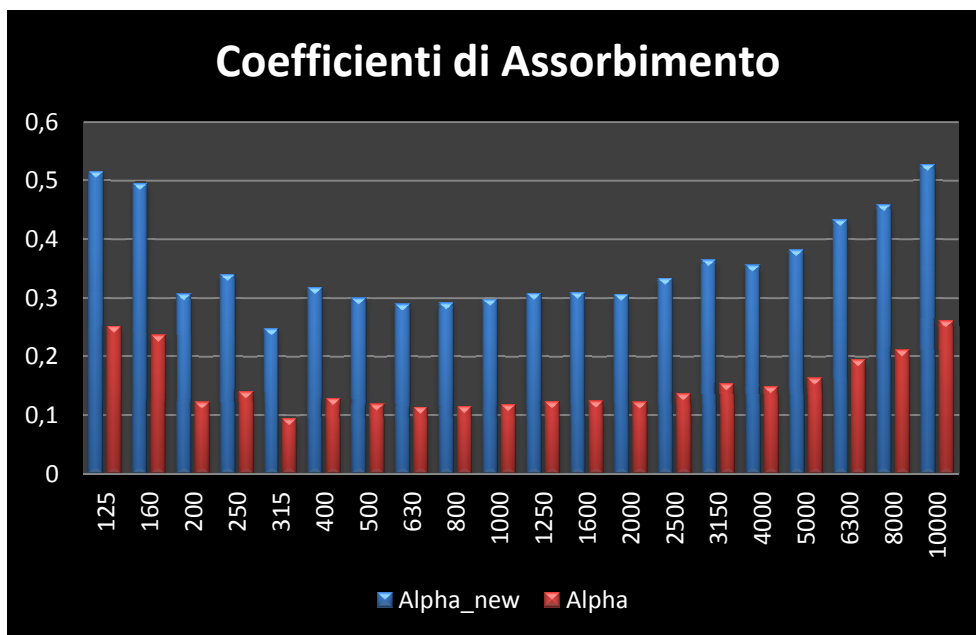
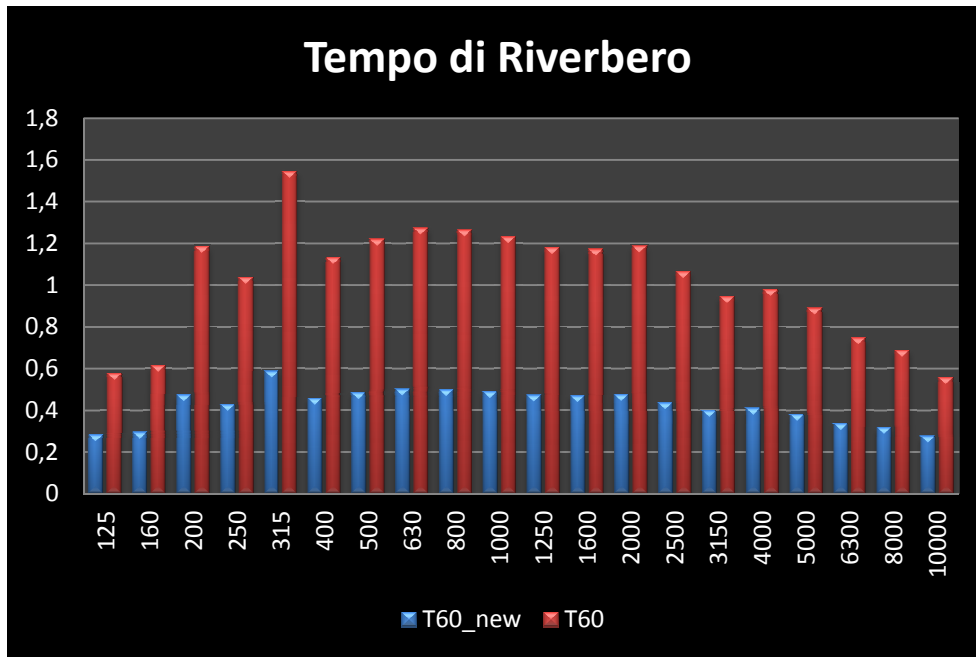



Figura 11.125. Grafici relativi ai tempi di riverbero ed ai coefficienti di assorbimento dell'ambiente e stimati dopo l'intervento

Successivamente, per venire incontro alle esigenze del cliente, si è optato per una riduzione del livello di pressione sonora di 3 dB, il che avrebbe comportato di trattare circa 134m^2 di superficie, per una riduzione stimata del tempo di riverbero di 0.58 sec, ed un aumento del coefficiente di assorbimento α_m=0.26.

Risultati ottenuti dopo i lavori

A seguito dei cambiamenti di progetto descritti nei capitoli precedenti, sono stati trattati 96m^2 di superficie con materiale fonoassorbente, ottenendo una riduzione di livello di pressione sonora dovuto al solo fonoassorbimento di poco più di 2 dB, come si evince dal seguente grafico ricavato dopo il test effettuato con sorgente dodecaedrica (si veda cap.7).

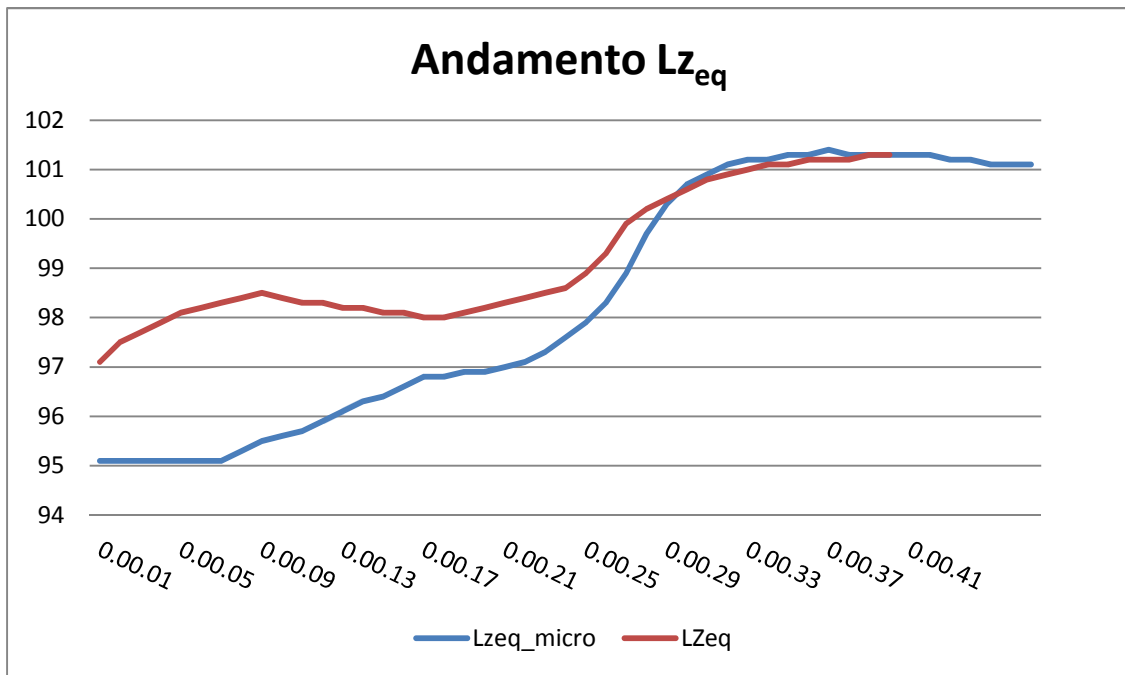



Figura 11.126. Livello di pressione sonora non ponderata rilevata tramite test con sorgente dodecaedrica prima e dopo l'installazione del materiale fonoassorbente

Considerando le misurazione effettuate con locale in attività, si è constatato che:

- Il tempo di riverbero è diminuito da 1.02 a 0.61 sec. (contro gli 0.58 voluti).

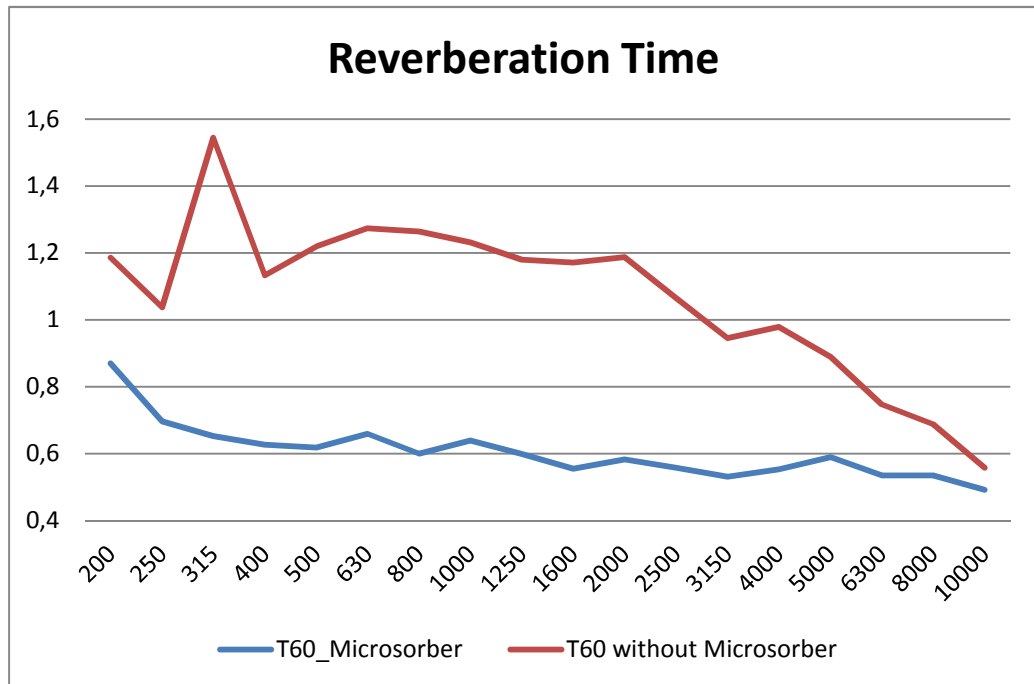



Figura 11.127. Grafico RT60 prima e dopo l'intervento di fonoassorbimento con locale in attività.

- Il coefficiente di assorbimento medio è aumentato da α_m=0.15 a α_m=0.24 (contro gli 0.26 voluti).

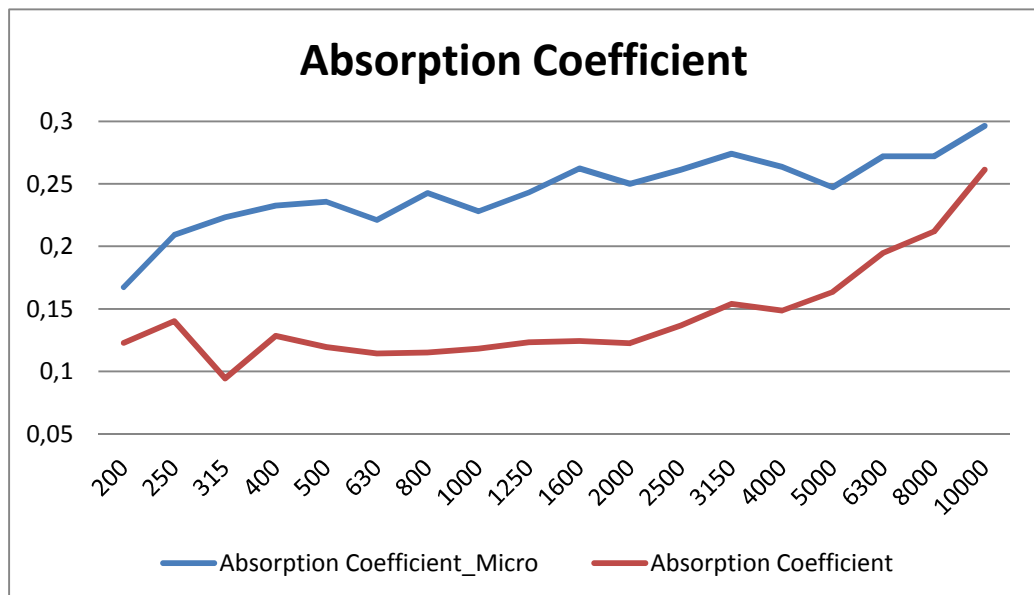



Figura 11.128. Grafico del coefficiente di assorbimento prima e dopo l'intervento di fonoassorbimento con locale in attività.

- Il livello di pressione sonora equivalente non ponderato è diminuito da L_{Zeq}=84 dB a L_{Zeq}=81 dB (-4 dB).

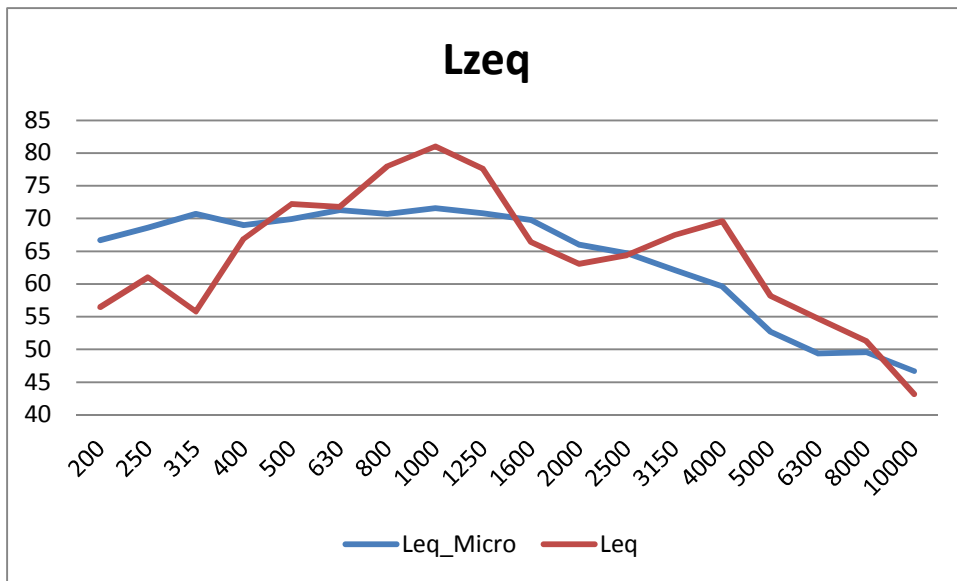



Figura 11.129.Grafico del livello di pressione sonora non ponderato prima e dopo l'intervento di fonoassorbimento con locale in attività.

- Il livello di pressione sonora equivalente ponderato A è diminuito da L_{Aeq}=79 dB a L_{Aeq}=73 dB (-6 dB).

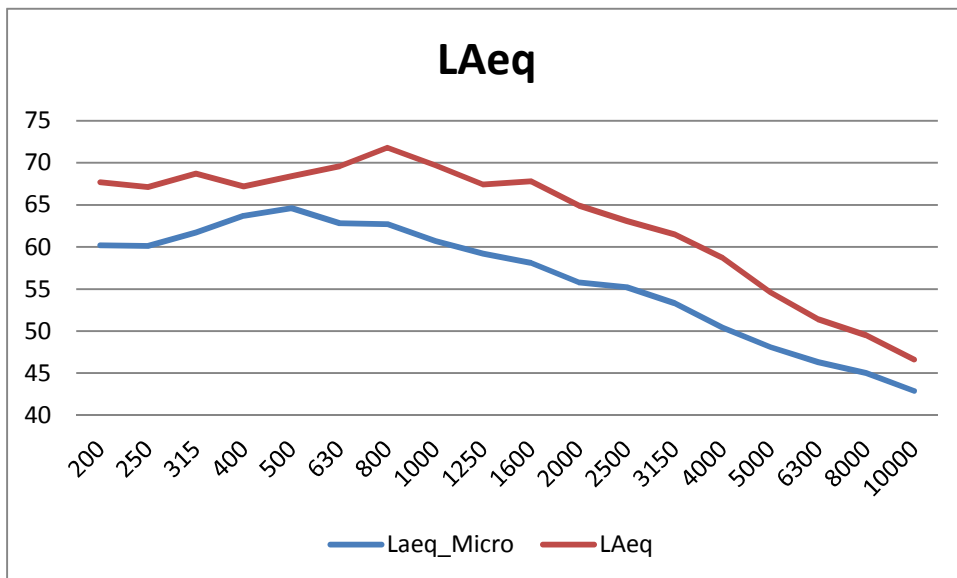



Figura 11.130. Grafico del livello di pressione sonora ponderato A prima e dopo l'intervento di fonoassorbimento con locale in attività.

Conclusioni

Come si può notare dai risultati, i valori ottenuti sono molto vicini a quelli stimati per un trattamento molto più esteso; si può infatti dire che lavorando su 96 m^2 di superficie sono stati ottenuti gli stessi risultati previsti per 134 m^2, con un conseguente guadagno sia in termini economici che d'impatto sul locale.

E' possibile notare la bontà dei risultati analizzando il grafico della costante d'ambiente R a seconda dell'estensione, in termini di metri quadrati, dell'intervento.

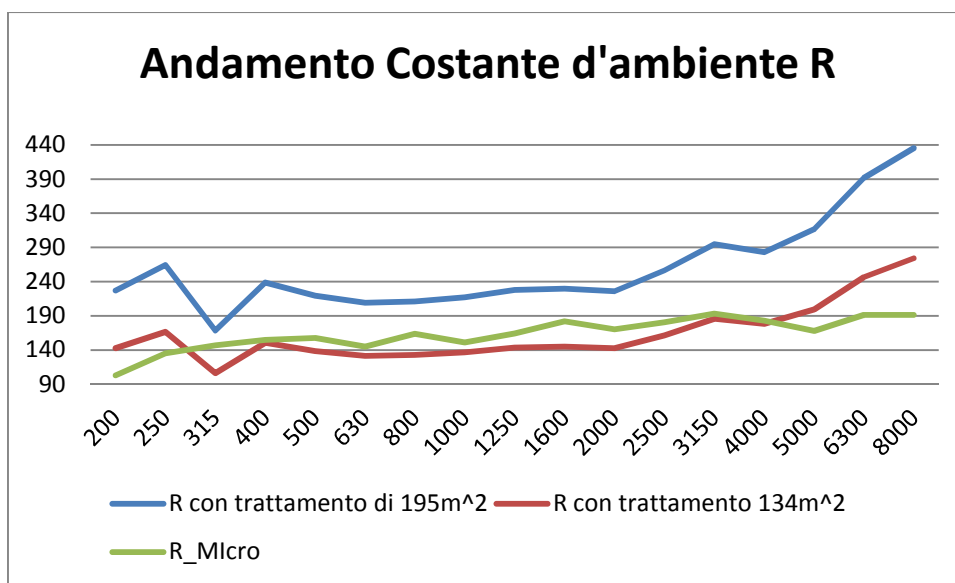



Figura 11.131. Grafico della costante d'ambiente R a seconda dell'estensione dell'intervento di fono assorbimento

Il livello di pressione sonora è inoltre diminuito di ben più dei 2 dB stimati in fase di progetto, ed il confort acustico del locale è risultato migliore ai clienti stessi che hanno espresso commenti positivi sia sull'intelligibilità ai tavoli che riguardo alla privacy fra gli stessi.

La musica di sottofondo, che in precedenza risultava completamente coperta dal rumore ambientale, ora è ben distinguibile e risulta un piacevole accompagnamento all'esperienza della tavola.

Il motivo per cui è stata rilevata una diminuzione di pressione sonora di più di 2dB, può essere ricavato analizzando nuovamente la tabella 11.1; ipotizzando, come fatto in precedenza, che i commensali fossero uniformemente distribuiti all'interno del ristorante,che in media durante le rilevazioni vi siano stati presenti in sala circa 60 persone, sapendo che il livello sonoro rilevato è stato di 73dBA, è possibile affermare che lo sforzo vocale esercitato da un parlatore sia di tipo "normale".

Tale risultato sta a significare che, a seguito di un miglioramento delle caratteristiche acustiche dell'ambiente soprattutto in termini di tempi di riverbero, le persone siano state portate a diminuire il proprio sforzo vocale da "sostenuto" a "normale" diminuendo, di conseguenza, il livello di pressione sonora generale generato; come descritto dall'effetto Lombard, avvertendo infatti un rumore ambientale più basso, il parlatore tende ad adattarsi diminuendo il volume della propria voce, e conseguentemente viene ridotta l'intera pressione sonora all'interno dell'ambiente.
Questo processo non è ovviamente infinito, ma si ferma una volta raggiunta una buona intelligibilità in relazione al tempo di riverbero ambientale.

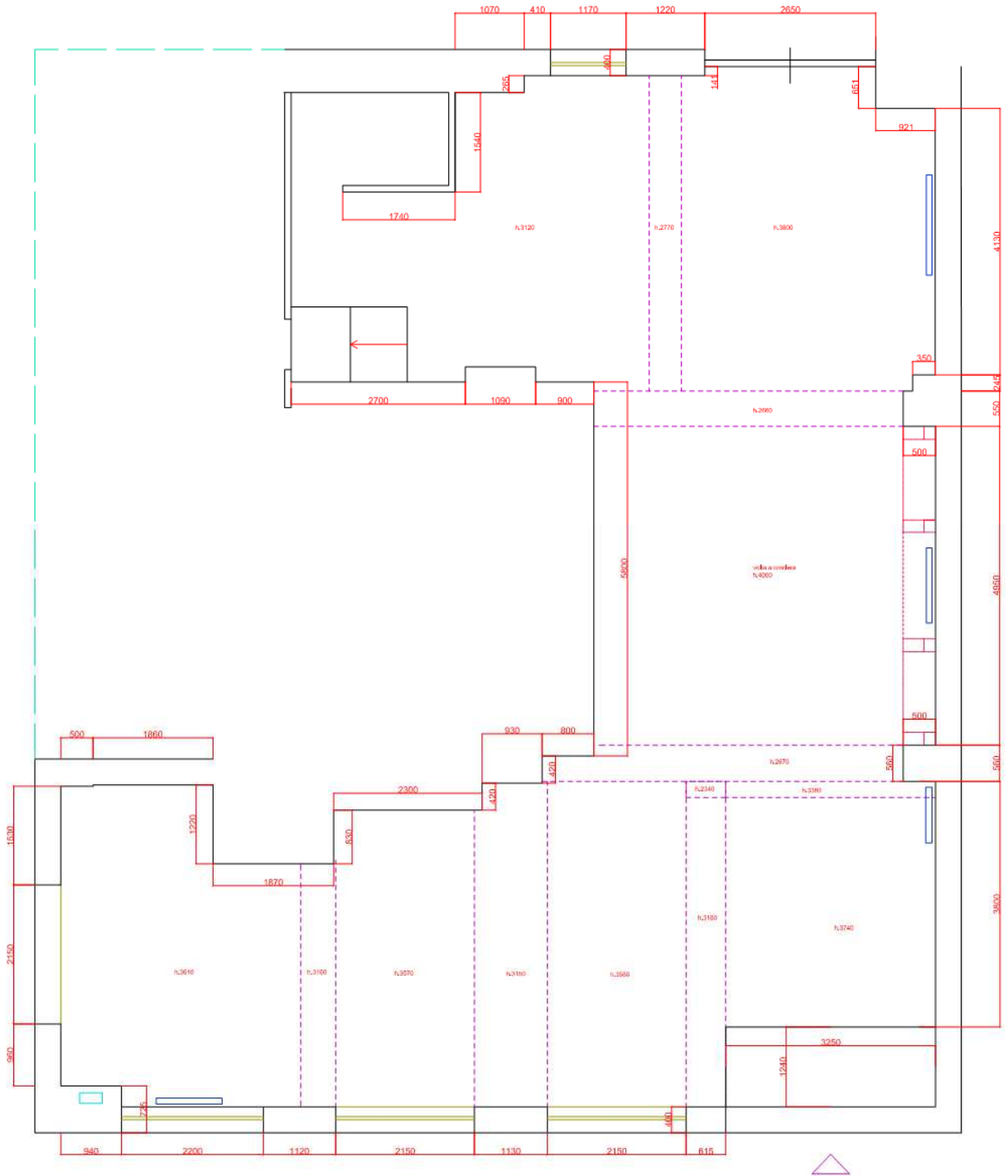
Tirando le somme, a seguito di tutte queste analisi, è possibile dire che si può migliorare l'efficienza di un materiale fonoassorbente all'interno di un locale sfruttando l'effetto Lombard.

Possibili sviluppi futuri

E’ ora difficile dare una regola generale che possa descrivere con precisione quanto si guadagni in termini di riduzione di pressione sonora sfruttando l’effetto Lombard; sarebbe necessario effettuare altri esperimenti simili a quello descritto in questa tesi.

E’ essenziale infatti ricordare che l’effetto sfruttato è di tipo psicoacustico, dipende quindi dalla persona e dal suo tono di voce, che varia a seconda dello stato d’animo. Proprio per questo motivo è fondamentale effettuare più rilevazioni possibili così da ottenere un risultato più generale; nel caso del ristorante Barracudino Easi&Chic, è possibile affermare che sfruttando l’effetto Lombard il livello di pressione sonora sia diminuito ulteriormente di un valore pari a 2dB (4dBA) rispetto a quanto pianificato in fase di progetto.

Un altro possibile studio da effettuare riguarda la musica di sottofondo da utilizzare: a seconda del brano riprodotto dagli speaker, in termini di bpm, timbro, genere musicale, è possibile analizzare in che modo può variare lo stato d’animo di una persona e, di conseguenza, il confort acustico dell’ambiente nel quale si trova (un ambiente sereno tenderà a tranquillizzare l’animo di un individuo).

Appendice 1
Pianta del ristorante Barracudino Easy&Chic

Appendice 2
Strumentazione utilizzata nelle rilevazioni effettuate

Tutte le rilevazioni sono state fatte rispettando la norma UNI 8832. La strumentazione utilizzata è la seguente:

- Fonometro “XL2 Audio and Acoustic Analizer” prodotto da NTiAudio montante un microfono a condensatore omnidirezionale M4260 prodotto anch’esso dalla NTiAudio. Questa configurazione permette di avere uno strumento di misurazione in Classe 2 secondo le norme IEC61672 e IEC60651.

- Generatore di segnale rosa “Minirator MR-PRO”, prodotto da NTiAudio.

- Speaker dodecaedrico DL301 distribuito da Look Line.

- Amplificatore “Street Audio AM200 Ice Series”

Riferimenti

"Elementi di Acustica" – E. Zandegiacomo

"Appunti di Acustica Applicata" – G. Comini

"Acoustics of Enclosed Spaces: Architectural Acoustics"

"Nozioni di Acustica Architettonica" – Davide Bonsi, materiale del corso di Metodologia Fisica per i Beni Culturali (Fisica Applicata) dell'Università Ca' Foscari, Venezia

"Acoustics - An introduction" - Kuttruff H. (2007) Taylor & Francis

"Acoustics" - Leo L. Beranek

"Acoustics And Hearing" - Peter Damaske

"Acoustics - Basic Physics, Theory And Methods" - Paul Filippi

"Master Handbook Of Acoustics" - F. Alton Everest

"Psicoacustica" – Dalle dispense del corso omonimo tenuto dalla Maestra Sapir, Conservatorio G.Verdi, Como

"Appunti di Psicoacustica" – Dalle dispense del corso Sound Analysis Synthesis end Processing tenuto dal Prof. Sarti, Politecnico di Milano, Como

"Acoustics And Psychoacoustics" - David M. Howard

"Metodologie e interventi tesnici per la riduzione del rumore negli ambienti di lavoro" – Ispesl

"Misure acustiche nelle sale" – M. Gardellini, Università degli Studi di Parma

"Requisiti acustici ed intelligibilità negli edifici ad uso collettivo" – A. Astolfi, Politecnico di Torino

"Acustica delle aule scolastiche" – A. Astolfi, M.Giovannini

"Effetto del rumore e della riverberazione sullo sforzo vocale degli insegnanti nella scuola primaria" – A. Astolfi, J. Nadalin, P. Bottalico, G. Riva, M. Garzaro, L. Raimondo, C. Giordano

"Dispense di acustica applicata" – A. Farina, Università degli Studi di Parma

"Esercitazione sull'inquinamento acustico" – L. Mazzarella, M. Cairoli, Politecnico di Milano

"Misure Fonometriche" – E. Landini

"Assorbimento Acustico – Manuale Tecnico Pratico" – L. Mattevi

"Catalogo General" – Acustica Integral

"www.labirintiacustici.it"

"Esercitazione 4: Isolamento Acustico" – Prof. Mazzarella, Ing. Cairoli

"Esercitazione 5: Requisiti acustici passivi degli edifici" – Prof. Mazzarella, Ing. Cairoli

"ACUSTICA ILLUSTRATA - D.P.C.M. 5 Dicembre 1997" – www.cidienne.it

"Controllo Attivo del Rumore" – M. Viola

"Realizzazzione di Dispositivi di Controllo Attivo del Rumore allo scarico dei motori a combustione interna a quattro tempi" – F. Asdrubali, C. Tosti, G. Baldinelli

"Il controllo Attivo del Rumore" - P. Guidorzi, Università di Bologna

"Bonifica Acustica: Controllo Attivo del Rumore e delle Vibrazioni" – ModuloUno S.r.l.